

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Estudo, implementação e teste de algoritmo de cálculo de índice de saúde de baterias

Vasco José Marcos Fraga

VERSÃO DE TRABALHO

**DISSERTAÇÃO REALIZADA NO ÂMBITO DO MESTRADO INTEGRADO EM
ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES**

Orientador: Hélder Filipe Duarte Leite

Coorientador: David da Silva Lima

15 de Julho de 2018

Resumo

Este projeto de dissertação foi proposto pela Operadora de Rede de Distribuição (ORD) portuguesa, EDP Distribuição SA, com o objetivo de desenvolvimento de um algoritmo para estimação do índice de saúde das suas baterias, sendo que estas baterias garantem o fornecimento de energia a todos os equipamentos das Subestações da ORD em caso de falha da rede elétrica.

Neste seguimento, o índice de saúde é um dos indicadores quantitativos da condição e desempenho de uma bateria. Deste modo, a ORD necessita de garantir a correta estimação deste indicador, de forma a melhorar o planeamento da manutenção e substituição destes ativos. A manutenção das baterias da ORD é realizada recorrendo a medições e ensaios de autonomia periódicos, sendo que o índice de saúde resulta do processamento e análise destas medições e ensaios.

Foram abordados e analisados os vários métodos de estimação de índice de saúde de baterias. Tal, serviu de base para a escolha do método a utilizar para o desenvolvimento do algoritmo, tendo em conta os recursos existentes e o contexto do problema.

São descritos todos os passos para o desenvolvimento do algoritmo, bem como toda a sua fundamentação inerente. Para a implementação do algoritmo, foi utilizado um *software* já existente na ORD de forma a facilitar e simplificar a análise de resultados. Relativamente à validação, esta foi separada em duas partes. Na primeira parte, foi realizada uma validação geral de forma a garantir que o algoritmo funciona corretamente para todos os tipos de baterias da ORD. Em segundo lugar foi realizada uma validação de sinalizações, onde foram elaboradas três validações complementares: análise de parâmetros de entrada do algoritmo; análise de registos no histórico de falhas da ORD; ensaio de autonomia total a dois grupos de baterias.

No final são apresentadas as conclusões relativas ao algoritmo desenvolvido e à metodologia adotada para a implementação e validação do mesmo.

Palavras-Chave: Sistemas de Proteção, Comando e Controlo; Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua; Baterias; Estimação do Índice de Saúde

Abstract

This dissertation project was proposed by the Portuguese Distribution Network Operator (DNO), EDP Distribuição SA, with the objective of developing an algorithm for health index estimation of its batteries, given that these batteries guarantee the energy supply of all the Substation's equipment in case of a power failure.

In this follow-up, the health index is one of the quantitative indicators of the condition and performance of a battery. Therefore, the DNO needs to guarantee the correct estimation of this indicator, in order to improve the planning of the maintenance and replacement of these assets. Maintenance of DNO batteries is carried out by performing periodic autonomy tests and measurements, given that the health index results from the processing and analysis of these measurements and tests.

The various methods of estimating the health index of batteries were discussed and analyzed. This was the basis for choosing the method to be used for the development of the algorithm, taking into account the existing resources and the context of the problem.

All the steps are described for the development of the algorithm, as well as all its inherent rationale. For the implementation of the algorithm, an existing software was used in order to facilitate and simplify the analysis of the results. Regarding the validation, this was separated into two sections. In the first section, a general validation was performed to ensure that the algorithm works correctly for all types of DNO batteries. In the second section, a flag validation was performed, where three complementary validations were elaborated: analysis of the algorithm's input parameters; analysis of the records in the DNO failure history; full autonomy test to two groups of batteries.

In the end, the conclusions regarding the algorithm developed and the methodology adopted for the implementation and validation of the algorithm are presented.

Keywords: Systems of Protection, Command and Control; Uninterruptible Power Supply; Batteries; Health Index Estimation.

Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores, Professor Doutor Helder Leite e ao Engenheiro David Lima por todo o apoio, conselhos e sugestões que generosamente puseram à minha disposição.

À EDP Distribuição pela oportunidade concedida em realizar a dissertação em ambiente empresarial, nomeadamente ao Departamento de Manutenção de Subestações do Porto.

Ao meu orientador da EDP Distribuição, o Engenheiro David Lima, gostava de mostrar o meu agradecimento por toda a ajuda, companhia e completa disponibilidade. Acredito que sem o seu apoio, este trabalho de dissertação teria sido bastante mais difícil de completar.

Agradeço em especial aos Técnicos David Silva, Fernando Rocha e Rui Ferreira e também a todo o pessoal do departamento pela boa disposição e pela transmissão de toda a sua experiência e conhecimentos técnicos, sempre cedidos com toda a paciência e disponibilidade possível.

Agradeço também aos Engenheiro Alberto Pinto e Helder Heitor pelos conselhos, simpatia e companhia, especialmente no pavilhão de futebol.

À minha família, em especial aos meus pais e à minha irmã por me terem apoiado e proporcionado as condições necessárias para o sucesso na vida académica.

À minha namorada e a todos os meus amigos e colegas que me incentivaram e me proporcionaram momentos de boa disposição e amizade durante esta fase importante do meu percurso académico.

“O que interessa é ser feliz, o resto é tanga.”

Ninguém, Nunca

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contextualização e objetivos	1
1.2	Estrutura da dissertação	2
2	Estrutura dos sistemas de uma Subestação AT/MT	3
2.1	Notas Introdutórias ao Operador da Rede de Distribuição	3
2.2	Sistemas de Proteção, Comando e Controlo (SPCC)	3
2.2.1	Diferentes Arquiteturas Hierárquicas de um SPCC	4
2.2.2	Componentes de um SPCC	6
2.3	Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua (SACC)	6
2.3.1	Arquiteturas dos SACC no Operador da Rede de Distribuição	7
2.3.2	Constituição dos SACCs	8
2.3.3	Funcionamento do SACC	8
3	Análise geral de baterias e práticas de manutenção e substituição	11
3.1	Introdução	11
3.2	Especificações técnicas de baterias	12
3.2.1	Capacidade	13
3.2.2	Tensão	13
3.2.3	Ciclo de vida	14
3.3	Métodos de recarga	14
3.4	Parâmetros relativos à condição da bateria	15
3.4.1	Tensão de circuito aberto (OCV - " <i>Open Circuit Voltage</i> ")	15
3.4.2	Profundidade de descarga (DOD - " <i>Depth of Charge</i> ")	15
3.4.3	Resistência interna	16
3.4.4	Estado de carga e estado de saúde	16
3.5	Baterias utilizadas pela EDP Distribuição	17
3.5.1	Baterias de chumbo-ácido	18
3.5.2	Baterias de níquel-cádmio	20
3.6	Práticas de teste, manutenção e substituição de baterias	21
3.6.1	Baterias de chumbo-acido VRLA	22
3.6.2	Baterias de níquel-cádmio (NiCd)	23
3.7	Testes e ensaios periódicos realizados na ORD	24
3.8	Equipamentos de medição e suporte	25
4	Algoritmos de estimação do índice de saúde de baterias	27
4.1	Introdução	27
4.2	Estimação do estado de carga (SOC) e estado de saúde (SOH)	28

4.2.1	Método tensão em circuito aberto (OCV)	29
4.2.2	Método baseado em ensaios de carga e descarga (tensão de descarga) . . .	30
4.2.3	Método baseado na medição da resistência interna	31
4.2.4	Método de <i>Coulomb Counting</i> e <i>Enhanced Coulomb Counting</i>	32
4.2.5	Método da espectroscopia eletroquímica da impedância (EIS)	33
4.2.6	Métodos que incorporam Redes Neurais Artificiais (ANN)	34
4.2.7	Métodos que incorporam sistemas de lógica difusa Fuzzy	36
4.2.8	Método que incorpora Filtro de Kalman (KF) ou Filtro de Kalman Estendido (EFK)	38
4.3	Comparações gerais entre os diferentes métodos de estimação do SOC e SOH . .	39
4.4	Conclusões	40
5	Análise e descrição dos algoritmos EDP-IS e EDP-IS-2018	43
5.1	Introdução	43
5.2	Algoritmo EDP-IS atualmente utilizado na ORD	43
5.2.1	Descrição do algoritmo EDP-IS	43
5.3	Algoritmo EDP-IS-2018	46
5.3.1	Parâmetro complementar: resistência interna ou condutância	47
5.3.2	Parâmetros estatísticos: desvio padrão e média aritmética	48
5.3.3	Descrição do algoritmo EDP-IS-2018	49
5.4	Conclusões	62
6	Validação e implementação do algoritmo EDP-IS-2018	65
6.1	Introdução	65
6.2	Plataforma utilizada para validação e implementação do algoritmo	65
6.3	Validação do algoritmo EDP-IS-2018	68
6.3.1	Análise geral de ensaios a diferentes grupos de baterias da ORD	68
6.3.2	Análise de sinalizações	69
6.3.3	Ensaio real para validação de sinalizações	72
6.4	Dificuldades encontradas e soluções propostas	75
6.5	Limitações do algoritmo EDP-IS-2018	75
7	Conclusões e propostas de melhoria	77
7.1	Conclusões	77
7.2	Propostas de melhoria	78
A	Relatório MPS e MPS medidas de um grupo de baterias	79
B	Relatórios individuais dos grupos de baterias das Subestações de Carregosa e Vale de Cambra	87
	Referências	91

Lista de Figuras

2.1	Arquitetura de um SPCC clássico [1]	5
2.2	Arquitetura de um SPCC numérico [1]	5
2.3	Arquitetura clássica de um SACC [2]	7
2.4	Arquitetura de um SACC recente [2]	7
2.5	Constituição do Armário de baterias e do alimentador de um SACC base e simplificado [3]	8
3.1	Funcionamento eletroquímico de uma bateria [2]	12
3.2	Capacidade disponível em relação à temperatura de uma bateria de níquel-cádmio e chumbo-ácido [4]	13
3.3	Método de recarga de tensão constante [5]	14
3.4	Método de recarga de tensão constante modificado [5]	15
3.5	Profundidade de descarga em função do número de ciclos restantes para o fim de vida de uma bateria [4]	16
3.6	Bateria SUNLIGHT OPZV 200	19
3.7	Bateria NARADA 12NDF100	20
3.8	Bateria SAFT SCL 221 [6]	21
3.9	Registo do sistema de alimentação	24
3.10	EC2000 [7]	26
3.11	FLUKE BT521 [8]	26
4.1	Relação entre OCV e SOC [9]	30
4.2	Relação entre tensão de descarga e SOC [10]	31
4.3	Estimação dos erros de diferentes métodos de <i>Coulomb Counting</i> [11]	33
4.4	Espectro da impedância de uma bateria em diferentes números de ciclos (fase de vida) [12]	34
4.5	Diagrama de blocos relativos à fase de treino de uma Rede Neuronal [13]	35
4.6	Validação da rede neuronal para estimação de SOC, relação entre SOC real e SOC estimado [13]	36
4.7	Regras Fuzzy que determinam as funções de relação entre SOC e resistência interna [14]	37
4.8	Funções do SOC para para cada intervalo do valor de resistência interna [14]	37
4.9	Validação do modelo Fuzzy desenvolvido em [14], relação entre a tensão do modelo e a tensão real da bateria	38
4.10	Comparação do método <i>Coulomb Counting</i> com e sem Filtro de Kalman Estendido, na estimação do SOC [15]	39
5.1	Degradação dos grupos de baterias relativamente à idade do grupo	45
5.2	Desequilíbrio entre células de um grupo de baterias [16]	48

5.3	Média da tensão de final de descarga dos elementos de diferentes grupos de baterias	50
5.4	Comparação entre a média da condutância de grupos de baterias do mesmo modelo com diferentes idades (1-2 anos e 10-11 anos)	51
5.5	Relação linear entre índice de saúde e a média aritmética da tensão e/ou condutância dos elementos de um grupo de baterias, expressa como percentagem do seu valor de referência	52
5.6	Comparação entre uma função linear e logarítmica no contexto do problema	53
5.7	Relação entre a média percentual da condutância e o peso de índice de saúde	54
5.8	Valores de condutância por elemento de um grupo de baterias novo da ORD	55
5.9	Relação entre a média percentual da tensão e o peso de índice de saúde	56
5.10	Valores de tensão por elemento de um grupo de baterias novo da ORD	57
5.11	Relação entre desvio padrão percentual da condutância entre vários grupos de baterias do tipo 1	58
5.12	Relação entre desvio padrão percentual da condutância entre vários grupos de baterias do tipo 1	59
5.13	Relação entre desvio padrão percentual da condutância entre vários grupos de baterias do tipo 2	59
5.14	Relação entre desvio padrão percentual da tensão entre diferentes grupos de baterias	60
5.15	Relação entre desvio padrão percentual da tensão entre vários grupos de baterias com idades diversas	61
5.16	Fluxograma do algoritmo EDP-IS_2018	62
6.1	Partição dos dados de referência (CardioBat)	66
6.2	Partição das configurações dos algoritmos (CardioBat)	66
6.3	Relatório individual do ensaio MPS medidas	67
6.4	Relação entre a média dos índices de saúde de um modelo específico de baterias da ORD com a idade dos grupo de baterias	69
6.5	Fotografia do painel da unidade de descarga de baterias	74
B.1	Relatório individual do grupo de baterias A da Subestação de Carregosa	88
B.2	Relatório individual do grupo de baterias B da Subestação de Vale de Cambra	89

Lista de Tabelas

3.1	Vantagens e desvantagens de baterias VRLA	19
3.2	Vantagens e desvantagens de baterias NiCd	21
5.1	Pesos dos parâmetros do algoritmo de estimação do índice de saúde da ORD, EDP-IS	44
5.2	Pesos dos conjuntos de elementos com diferentes intervalos percentuais do parâmetro tensão	46
5.3	Pesos dos parâmetros corrosão do armário e do grupo de baterias	46
5.4	Pesos dos parâmetros do algoritmo de estimação do índice de saúde EDP-IS-2018	49
6.1	Análise geral da estimação do índice de saúde de diferentes grupos de baterias . .	68
6.2	Análise dos parâmetros de dois grupos de baterias do mesmo modelo com idades distintas	70
6.3	Tempo de falhas que resultem na utilização dos grupos de baterias	71
6.4	Resultados dos ensaios de autonomia aos grupos de baterias A e B	74
6.5	Análise à média da temperatura nos últimos relatórios MPS	75

Abreviaturas e Símbolos

ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
AT	Alta Tensão
AGM	<i>Absorvent Glass Mat</i>
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CDC	Centro de Condução
CC	Corrente Contínua
DC	Despacho Central
DOD	<i>Depth of Discharge</i>
EIS	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i>
EKF	<i>Extended Kalman Filter</i>
KF	<i>Kalman Filter</i>
IED	<i>Intelligent Electronic device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IHM	Interface Homem-Maquina
MT	Média Tensão
OCR	Órgãos de Corte de Rede
ORD	Operador da Rede de Distribuição
PCL	Posto de Comando Local
PT	Postos de Transformação
OCV	<i>Open Circuit Voltage</i>
RLC	Rede Local de Comunicações
RND	Rede Nacional de Distribuição
SACC	Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SE	Subestação Elétrica
SPCC	Sistemas de Proteção, Comando e Controlo
SOC	<i>State of Charge</i>
SOH	<i>State of Health</i>
UC	Unidade Central
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
URTA	Unidade Remota de Teleação e Automação
VRLA	<i>Valve-Regulated Lead-Acid</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização e objetivos

Hoje em dia, existe interesse por parte da Operadora da Rede de Distribuição (ORD) em garantir o contínuo fornecimento de energia elétrica aos consumidores. Desta forma, as Subestações (SE) AT/MT sendo um dos principais elementos da Rede Nacional de Distribuição (RND), incorporam Sistemas de Proteção Comando e Controlo (SPCC) responsáveis pela controlo remoto e local das SE.

Deste modo, o funcionamento ininterrupto destes sistemas, são assegurados pelos Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua (SACC) que incorporam grupos de baterias. Em caso de falha na rede elétrica, o fornecimento de energia elétrica a todos os equipamentos de proteção, comando, controlo e telecomunicações é garantido pelos SACC.

Tendo em conta que os equipamento da SE, em concreto os SPCC, são imprescindíveis para operações de manobra na rede, a correta gestão e manutenção dos grupos de baterias é essencial para uma boa qualidade do serviço e diminuição do tempo anual de falha de fornecimento energético aos consumidores.

Na ORD, os processos de manutenção e substituição destes grupos de baterias têm vindo a ser melhorados ao longo dos anos, visto que estes têm um grande impacto na qualidade do serviço da rede. Posto isto, um dos principais indicadores que caracterizam o desempenho de uma bateria é o índice de saúde da mesma, sendo que existe uma necessidade crescente em melhorar a precisão de estimação deste indicador. Desta forma, esta necessidade levou ao desenvolvimento de vários métodos de estimação do índice de saúde.

Atualmente, o processo de manutenção dos grupos de baterias da ORD, é realizado recorrendo a ensaios de autonomia periódicos. Destes ensaios, resultam medições de certos parâmetros, que são utilizados por um algoritmo para a estimação do índice de saúde dos respetivos grupos de baterias da ORD.

Deste modo, foram definidos os seguintes objetivos para este :

- Estudar os diferentes tipos de baterias utilizadas pela ORD

- Estudar as práticas de manutenção e substituição de baterias
- Estudar os diferentes métodos de estimação de índice de saúde de baterias
- Analisar o algoritmo de estimação de índice de saúde de baterias da ORD
- Desenvolver um algoritmo de estimação de índice de saúde de baterias
- Implementar o algoritmo de estimação de índice de saúde de baterias
- Validar o algoritmo de estimação de índice de saúde de baterias
- Assegurar que o algoritmo funciona para qualquer tipo, marca e modelo de baterias da ORD

1.2 Estrutura da dissertação

Este documento está estruturado em sete capítulos. Neste primeiro capítulo são apresentados a contextualização e objetivos da dissertação, bem como a sua estrutura.

O capítulo dois consiste na revisão de literatura relativa aos Sistemas de Proteção, Comando e Controlo (SPCC) e Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua (SACC). São descritos os seus componentes e diferentes arquiteturas atualmente em funcionamento na Operadora da Rede de Distribuição (ORD).

O capítulo três consiste na revisão de literatura relativa a baterias utilizadas na ORD, bem como algumas das suas especificações técnicas. São também mencionados parâmetros que interferem ou caracterizam a condição de uma bateria, e por fim são apresentadas as práticas de manutenção de baterias segundo a IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e também as utilizadas pela ORD.

No capítulo quatro são apresentados os métodos existentes para a estimação do índice de saúde, mais concretamente dos parâmetros estado de carga (SOC) e estado de saúde (SOH). São analisados todos os métodos com base em artigos que realizaram uma implementação prática do método, sendo que no final do capítulo é realizada uma análise geral para considerar a elegibilidade de cada método para a sua implementação neste trabalho de dissertação.

No quinto capítulo é descrito o algoritmo atualmente utilizado na ORD, denominado EDP-IS. Posteriormente é descrito o novo algoritmo, denominado EDP-IS-2018, e toda a metodologia que foi utilizada para o desenvolvimento do mesmo.

O sexto capítulo deste trabalho de dissertação, apresenta a implementação e validação do algoritmo proposto (EDP-IS-2018). É apresentada a plataforma utilizada para a implementação do algoritmo, bem como todos os processos para a validação do mesmo. No final foram também apresentadas as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento e implementação do algoritmo e quais as soluções adotadas.

No sétimo, e último capítulo, apresenta as principais conclusões e contribuições deste trabalho de dissertação. Nesse capítulo, também é apresentada uma lista de sugestões de possíveis trabalhos para o futuro.

Capítulo 2

Estrutura dos sistemas de uma Subestação AT/MT

Neste capítulo, serão descritos os vários sistemas existentes numa subestação AT/MT da Operadora da Rede de Distribuição (ORD) portuguesa, mais concretamente, os Sistemas de Proteção, Comando e Controlo (SPCC) e os sistemas de Alimentação de Corrente Contínua (SACC). Será também descrita a estrutura e funcionamento destes sistemas.

2.1 Notas Introdutórias ao Operador da Rede de Distribuição

A Operadora da Rede de Distribuição portuguesa, EDP Distribuição SA, é titular da concessão para a exploração da Rede Nacional de Distribuição (RND) de energia elétrica, em concreto, em Média Tensão (MT), Alta Tensão (AT), bem como as concessões municipais de distribuição em Baixa Tensão (BT) [17]. Desta forma, a RND é constituída por equipamentos, capazes de realizar a transmissão e distribuição da energia elétrica, de modo a que esta possa ser entregue ao consumidor doméstico, comercial ou pequeno industrial.

Sendo um elemento integrante da RND, as Subestações AT/MT, têm como principal objetivo a transformação da energia elétrica de Média Tensão (MT) para Alta Tensão (AT), e vice-versa, possibilitando a transmissão e distribuição da mesma até aos consumidores.

2.2 Sistemas de Proteção, Comando e Controlo (SPCC)

As subestações AT/MT da EDP Distribuição são constituídas por Sistemas de Proteção, Comando e Controlo (SPCC), sendo que estes sistemas desempenham certas funções essenciais para assegurar o preciso funcionamento da subestação, entre elas:

- Proteção: é necessário que o sistema detete e elimine diversos tipos de defeitos que possam ocorrer na subestação, posteriormente à ocorrência do defeito também é necessário o isolamento da zona do defeito com seletividade, mantendo as restantes em serviço;

- Comando: é esperado que o sistema opere a RND tanto a nível local como remoto, bem como a implementação de mecanismos de segurança como encravamentos e bloqueios;
- Controlo, a execução automática de funções, como deslastre e reposição, regulação automática de tensão, comando horário das baterias de condensadores, são ações executadas por este sistema. A recolha de informação sobre o estado da rede é também uma das funcionalidades do sistema [1].

Estes sistemas incorporados nas subestações AT/MT possibilitam que a monitorização do sistema elétrico seja realizada de forma remota, recorrendo a dispositivos de aquisição de dados que transmitem informação sobre o estado das operações dos equipamentos, possibilitando uma resposta de controlo adequada. Os SPCC são compostos por várias aplicações e serviços que asseguram a supervisão e monitorização da subestação, sendo estes:

- SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition): este serviço possibilita a supervisão e comando da subestação, local ou remotamente;
- Telecontagem: este serviço possibilita a recolha diária de impulsos correspondentes aos valores de contagem de energia nos diferentes painéis da Subestação de Energia Elétrica (SE), onde posteriormente serão pedidos e enviados para uma unidade central de tratamento;
- Teleengenharia: este possibilita a alteração dos parâmetros e o modo de funcionamento das funções e de automatismos, bem como, a recolha de dados relativos ao registo de acontecimentos nas unidades de painel;
- Supervisão de equipamentos é um serviço de manutenção e supervisão remota, fornecido pelos equipamentos constituintes da SE [17].

2.2.1 Diferentes Arquiteturas Hierárquicas de um SPCC

Hoje em dia na ORD, existem dois tipos de arquiteturas de SPCCs em funcionamento. Em primeiro lugar, os sistemas clássicos, sendo estes mais antigos, com uma filosofia centralizada do processamento da informação, onde as funções de proteção estão fisicamente separadas das funções de comando e controlo. Por outro lado, os sistemas numéricos, são sistemas mais recentes onde as funções de proteção, comando e controlo se encontram interligadas e com uma filosofia descentralizada do processamento e transmissão de dados.

Nos sistemas clássicos, é utilizado um autómato, designado por Unidade Remota de Teleação e Automação (URTA) que é responsável por armazenar e processar toda a informação da subestação, onde o hardware responsável pelas funções de proteção é fisicamente distinto do responsável pelas funcionalidades de comando e controlo. Este sistema também não dispõe de uma Rede Local de Comunicações (RLC) que já existe nas arquiteturas mais recentes [1].

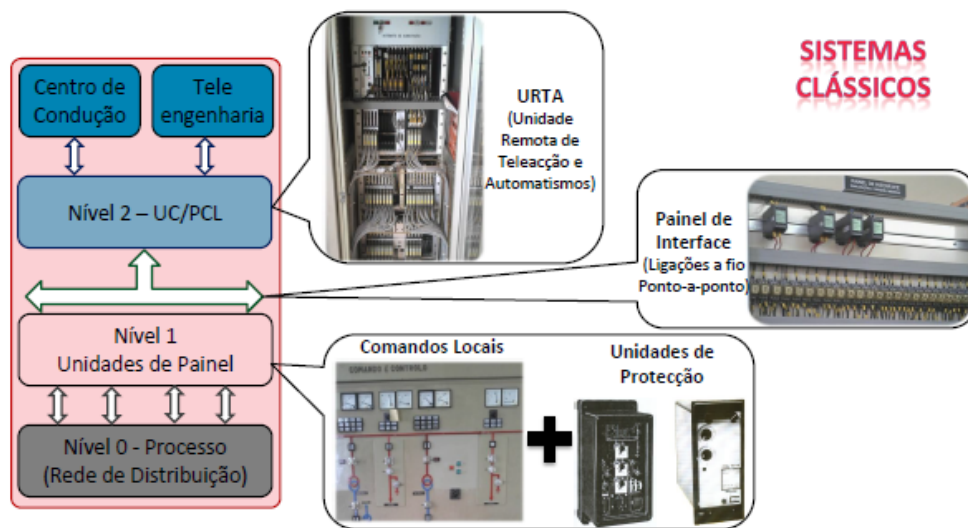


Figura 2.1: Arquitetura de um SPCC clássico [1]

Devido ao aumento da capacidade de processamento dos equipamentos e das redes de dados, foi possível a integração do Sistema de Proteções com o Sistema de Controlo e Comando, dando origem aos sistemas numéricos. Deste modo, ocorreu uma descentralização dos automatismos dos SPCC devido ao aparecimento dos IED (*Intelligent Electronic Device*). As ligações entre estes e a Unidade central (UC), passou a ser feita por uma rede *ethernet* designada por Rede Local de Comunicação (RLC), sendo esta suportada fisicamente por fibra ótica [18].

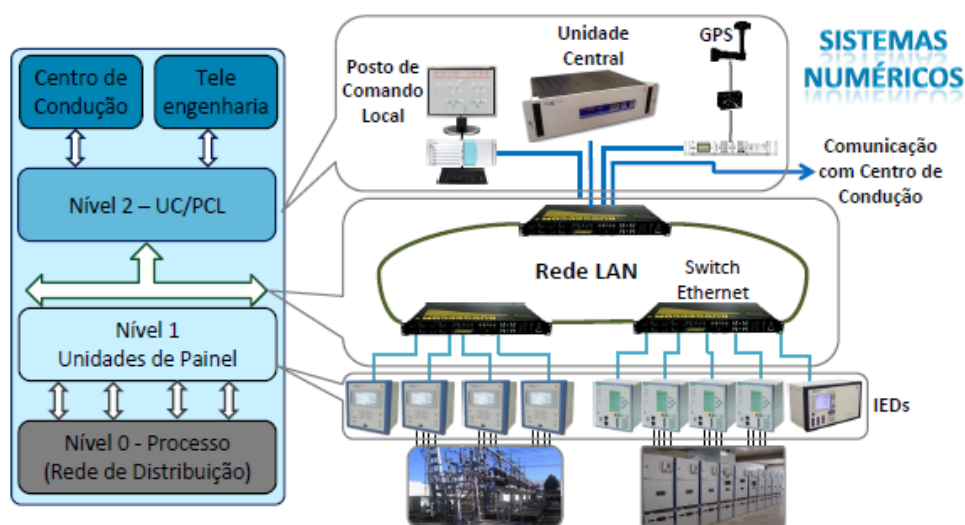


Figura 2.2: Arquitetura de um SPCC numérico [1]

2.2.2 Componentes de um SPCC

Um SPCC é constituído por diversos módulos de processamento de informação, sendo que o seu correto funcionamento é essencial para o bom desempenho de todos os equipamentos da SE. Na figura 2.2 está representada uma arquitetura numérica de um SPCC, onde é possível verificar uma estrutura hierárquica, dividida em vários níveis:[19]

- Nível 0 (Nível de Processo):

O nível de processo é o nível com o grau hierárquico mais baixo da SE, onde podem ser encontrados equipamentos primários, necessários para a monitorização e operação dos equipamentos da SE. A comunicação entre o nível 0 e o nível 1 é realizada através de ligações ponto a ponto.

- Nível 1 (Unidade de Painel/Dispositivos Eletrónicos Inteligentes):

O nível 1 é o nível intermédio, onde se encontram os equipamentos responsáveis por desempenhar as funções de proteção, comando e controlo da SE. Estes equipamentos consistem em unidades separadas ou combinadas responsáveis por zonas específicas da SE.

- Nível 2 Unidade Central (UC) e Postos de Comando Local (PCL):

O nível 2 é o nível mais alto da SE onde são desempenhadas as funções relacionadas o controlo de toda a instalação no local e remotamente. Neste nível, encontram-se também localizados computadores industriais e a Interface Homem-Maquina (IHM). O acesso remoto pode estar disponível por ligação telefónica ou por IP.

Assim, o SPCC deve facultar de forma contínua toda a informação gerada e proveniente da interação com a SE ao nível superior, o Centro de Condução (CDC), de forma a garantir que as funções de comando e controlo da SE possam ser realizadas remotamente.

2.3 Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua (SACC)

Os Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua (SACC) de uma subestação garantem o funcionamento dos SPCC em caso de falha, sendo estes consequentemente responsáveis pela alimentação de todos os equipamentos de supervisão, controlo, emergência, comunicação e proteção existentes na SE.

Em condições normais, é necessário que o SACC de uma SE seja capaz de interagir continuamente com o SPCC da infraestrutura, visto que em caso de falha na rede de distribuição, uma falha nos SACC inviabiliza totalmente a operação da rede por parte do Centro de Condução (CDC), comprometendo desta forma o funcionamento do SPCC e consequentemente da SE.

Desta forma, é de extrema importância que estes sistemas alimentem em permanência todos os circuitos de corrente contínua existentes na SE e assegurar, em simultâneo, a carga das baterias em qualquer um dos seus regimes de funcionamento [3].

Tendo em conta a importância destes sistemas para a SE, os SACC devem estar preparados para suportar certas condições gerais de funcionamento. Em [3], encontram-se descritas estas condições, tais como: condições ambientais, condições de compatibilidade eletromagnética e condições de alimentação.

2.3.1 Arquiteturas dos SACC no Operador da Rede de Distribuição

Nas subestações AT/MT da ORD podemos encontrar diferentes tipos de estruturas de Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua (SACC). As arquiteturas mais antigas, clássicas, ainda presentes em algumas SE, consistem no uso de vários módulos retificadores com as tensões específicas necessários na SE e um grupo de baterias auxiliares do mesmo nível de tensão (110Vcc/ 48Vcc / 24Vcc/ 12Vcc) [20].

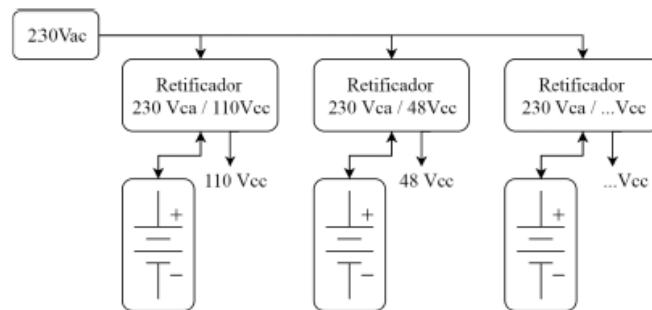


Figura 2.3: Arquitetura clássica de um SACC [2]

Na figura 2.3, podemos observar a estrutura de uma arquitetura clássica dos SACC, onde cada retificador seria alimentado por um respetivo grupo de baterias de tensão equivalente. No caso das arquiteturas mais recentes, na figura 2.4, é usado apenas um retificador de 230Vca/110Vcc com um grupo de baterias de tensão equivalente e finalmente os restantes retificadores e grupos de baterias, usados nas arquiteturas clássicas, são substituídos por conversores CC/CC do nível de tensão necessária [20].

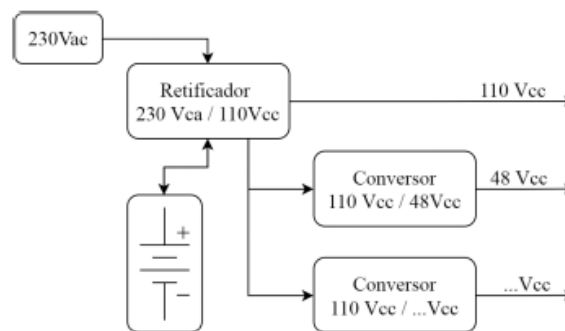


Figura 2.4: Arquitetura de um SACC recente [2]

2.3.2 Constituição dos SACCs

O Sistema de Alimentação de Corrente Contínua (SACC), é constituído pelo alimentador que incorpora diferentes módulos, painéis e um transformador de entrada, bem como pelo armário de baterias que incorpora um grupo de baterias, estando as suas especificações descritas na tabela 2.5.

Armário	Equipamentos	SA base 110 V _{CC}	SA base 125 V _{CC}	SA simplificado 110 V _{CC}	SA simplificado 125 V _{CC}
Alimentador	Designação	Alimentador base		Alimentador simplificado	
	Módulo Retificador 230V _{CA} /110V _{CC}	3	3	2	2
	Módulo Conversor 110V _{CC} /48V _{CC}	2	2	2	2
	Módulo de Supervisão e Controlo	1	1	1	1
	Módulo de Diodos Redutores	1	1	1	1
	Transformador de Entrada	1	1	1	1
	Painel 230 V _{CA}	1	1	1	1
	Painel 110 V _{CC}	1	1	1	1
	Painel 48 V _{CC}	1	1	1	1
Armário das Baterias	Designação	Armário Bateria 200Ah – 110 V _{CC}	Armário Bateria 200Ah – 125 V _{CC}	Armário Bateria 100Ah – 110 V _{CC}	Armário Bateria 100Ah – 125 V _{CC}
	Capacidade	200Ah	200Ah	100Ah	100Ah
	N.º Elementos de bateria	86	90	86	90

Figura 2.5: Constituição do Armário de baterias e do alimentador de um SACC base e simplificado [3]

O armário do alimentador contém entre outros equipamentos, os disjuntores de BT que alimentam os diversos circuitos de tensão contínua da SE, bem como circuitos de comando, proteção e medida. Na figura 2.5 é descrito o armário de baterias e a sua capacidade consoante a estrutura do SACC [3].

Na figura 2.5, são apresentadas duas diferentes estruturas de SACC, nomeadamente base e simplificado, sendo que existe uma diferença na quantidade de componentes que integram o alimentador. É de realçar, que estas duas estruturas possibilitam a adaptação de diferentes necessidades de carga das instalações. Uma vantagem da existência destes dois modelos é a possibilidade de expansão do modelo, ou seja, se for necessário uma capacidade maior, é possível a expansão do modelo simplificado para o modelo base dependendo das necessidades da SE [3].

2.3.3 Funcionamento do SACC

Em condições de funcionamento normais, os módulos retificadores estão ligados em paralelo entre si e as baterias, e independentemente das suas variações deverão garantir uma tensão nominal de saída constante, dentro dos limites admissíveis da tensão, frequência da rede e do consumo das cargas [3].

Os módulos retificadores alimentam a carga de utilização dos equipamentos e a recarga das baterias. A tensão de saída destes módulos deve ser monitorizada continuamente em função da temperatura medida junto da mesma, de acordo com as especificações do fabricante [3].

Para evitar transitórios de corrente no momento da sua ligação, os módulos retificadores e conversores são equipados com um circuito de arranque lento. Deste modo, os módulos retificadores não deverão necessitar das baterias para o seu arranque e funcionamento [3].

O SACC, deve ainda conter uma resistência de descarga, que apenas deve ser utilizada nos testes de autonomia das baterias. Esta deve ser dimensionada de acordo com as características do alimentador e do grupo de baterias, garantindo uma corrente mínima de descarga da bateria de 10A. A resistência de descarga é regulada pelo módulo de supervisão e controlo, de acordo com a corrente de carga de utilização, ou seja, se esta for 3A a resistência de descarga terá de assegurar os restantes 7A para garantir a corrente mínima de descarga de 10A [3].

Também é necessário que o SACC contenha um dispositivo de proteção contra a descarga total das baterias, visto que as descargas totais podem reduzir drasticamente a esperança de vida das baterias [3]. E por fim, existem sensores de temperatura, tensão e corrente para prevenir qualquer falha ou danos nos equipamentos do SACC [3].

Capítulo 3

Análise geral de baterias e práticas de manutenção e substituição

3.1 Introdução

A energia elétrica tem um papel importante na nossa vida cotidiana, visto poder ser convertida em luz, calor ou energia mecânica. No entanto, um dos problemas é a dificuldade da mesma ser armazenada. Normalmente, o armazenamento de energia elétrica é conseguido através da conversão da energia elétrica para outra forma de energia, no caso das baterias a energia é convertida para energia química para ser armazenada.

As baterias são dispositivos capazes de converter energia elétrica em energia química ou vice-versa, consoante a necessidade de armazenamento ou uso da mesma, respetivamente. Esta conversão de energia é realizada através de uma reação eletroquímica denominada *redox*, composta por oxidação (perda de eletrões) e redução (ganho de eletrões) [21].

As baterias são compostos por uma ou mais células eletroquímicas, organizadas em paralelo e/ou em série dependendo da capacidade e tensão nominal requeridas. Estas células são compostas por três elementos [21]:

- Cátodo ou eletrodo positivo: Recebe os eletrões provenientes do circuito externo, sofrendo redução.
- Ânodo ou eletrodo negativo: Direciona os eletrões para o circuito externo, sofrendo oxidação.
- Eletrólito: É uma solução ionizada, normalmente em forma líquida, que garante a condução de energia elétrica.

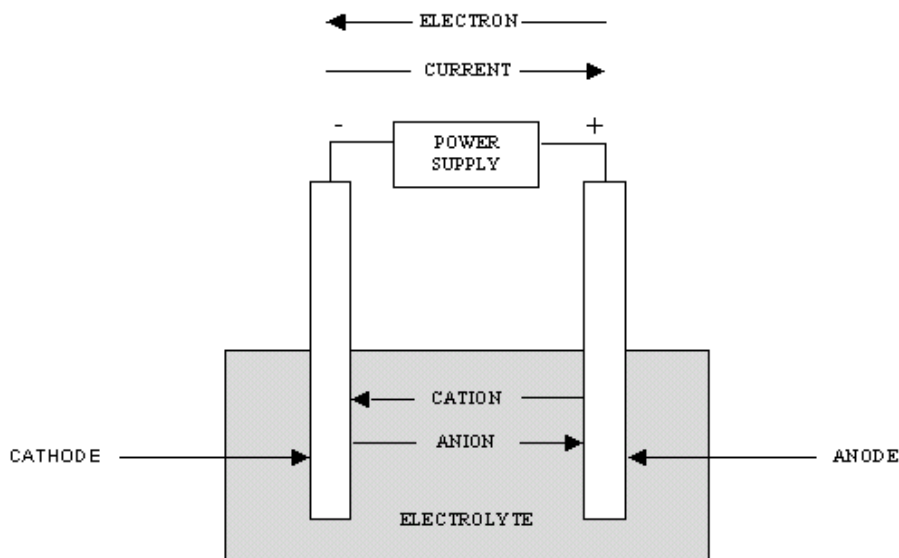


Figura 3.1: Funcionamento eletroquímico de uma bateria [2]

Para algumas baterias, este processo é reversível havendo então possibilidade da bateria ser recarregada. Desta forma, existem diferentes classificações para as células que compõem as baterias, sendo esta classificação relativa à capacidade das mesmas serem recarregadas ou não.

As baterias compostas por células primárias ou *dry cells*, caracterizam-se por não serem facilmente recarregáveis e normalmente necessitam de ser substituídas após uma descarga completa. Geralmente são projetadas para uma única utilização. Embora estas baterias só possam ser utilizadas uma vez, têm as vantagens de serem económicas, leves e necessitam de pouca ou nenhuma manutenção. Desta forma, estas baterias têm utilidade para algumas aplicações, como por exemplo: fonte de energia elétrica para alguns dispositivos eletrónicos e elétricos portáteis [4, 22].

As baterias secundárias ou também designadas de acumuladores, podem ser recarregadas várias vezes após uma descarga completa. Estas são recarregadas por uma fonte CC até ao seu estado inicial, através da passagem de corrente no sentido oposto ao da corrente de descarga. Este tipo de baterias são geralmente utilizadas em aplicações que necessitam de dispositivos de armazenamento de energia e também para aplicações destinadas a baterias com células primárias [4, 22].

3.2 Especificações técnicas de baterias

As baterias são geralmente classificadas consoante a sua tensão (V) e a capacidade (Ah) nominal. Para responder às necessidades do mercado, hoje em dia é possível observar uma elevada oferta relativamente à diversidade de baterias por parte dos fabricantes. No entanto, existem certos parâmetros, indicadores e funções que são comuns a todos os tipos de baterias e que serão bastante relevantes para o desenvolvimento desta dissertação

3.2.1 Capacidade

A capacidade é a quantidade de energia elétrica que a bateria consegue fornecer sobre determinadas condições, desde 100 por cento do estado de carga até à tensão de corte, sendo esta a tensão mínima admitida, que define o estado "vazio" da bateria. A capacidade é normalmente definida pelos fabricantes em Ampere-hora (Ah), definida como a quantidade de carga elétrica que pode ser transferida pela bateria durante uma hora [4].

Contudo, a capacidade total disponível não é um parâmetro fixo, podendo variar bastante da capacidade nominal da bateria, visto que esta depende sempre de fatores como a temperatura, corrente de descarga, idade da bateria e profundidade de descarga. Geralmente os fabricantes fornecem informação relativa à variação da capacidade da bateria com certos parâmetros [23].

Na figura 3.2 é possível notar a elevada variação da capacidade disponível consoante a temperatura, para baterias do tipo chumbo-ácido e níquel-cádmio.

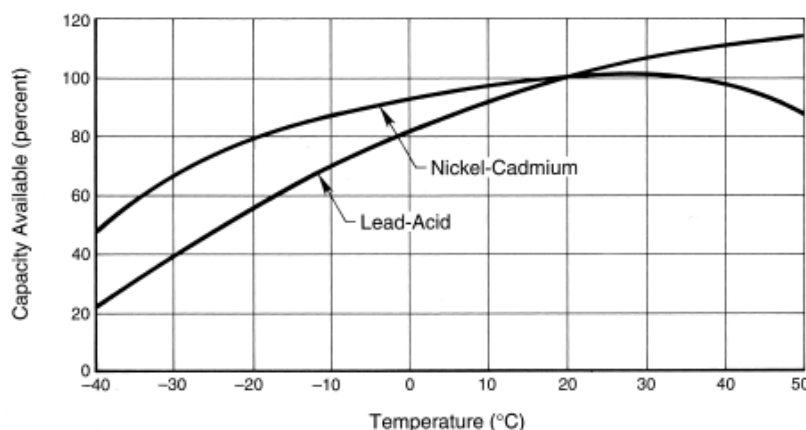


Figura 3.2: Capacidade disponível em relação à temperatura de uma bateria de níquel-cádmio e chumbo-ácido [4]

A corrente de descarga de uma bateria é indicada pela taxa de descarga, sendo esta geralmente expressa como taxa da capacidade (C), para que este parâmetro esteja normalizado de acordo com a capacidade da bateria. Uma taxa de corrente de descarga de 1C significa que a corrente de descarga irá descarregar a bateria por completo em uma hora [24].

3.2.2 Tensão

A tensão total de um grupo de baterias é baseada no número de células conetadas em série, bem como a tensão nominal de cada uma das célula do grupo, variando sempre consoante o tipo de bateria em questão. Para obter a tensão total do grupo, é necessário multiplicar a tensão nominal das células pelo número de células conetadas em série. A tensão de cada célula não é um valor constante, dependendo sempre de fatores como o estado de carga e da temperatura da bateria [23].

3.2.3 Ciclo de vida

O ciclo de vida é representado pelo número de ciclos de cargas e descargas a que uma bateria pode ser sujeita, antes que deixe de cumprir os critérios mínimos de funcionamento. Este é estimado tendo em conta condições de carga e descarga específicas. O tempo real de vida de uma bateria é afetado por variáveis como a temperatura, humidade, número de ciclos realizados, bem como a profundidade dos ciclos de descarga (DOD). Quanto maior a profundidade dos ciclos de descarga e número de ciclos, menor o a esperança de vida de uma bateria [24].

3.3 Métodos de recarga

O pré-requisito para que uma bateria inicie a sua recarga, é a tensão aplicada ser superior à tensão em circuito aberto nos terminais da bateria. O método de recarga é escolhido tendo em conta a maximização da saúde da bateria, visto que excesso de recarga pode resultar num aumento da temperatura, que consequentemente diminui bastante o tempo de vida de uma bateria.

Deste modo, existem vários métodos para realizar a recarga de baterias sendo que cada um deles apresenta as suas vantagens e desvantagens consoante o tipo de bateria e aplicação para a qual esta a ser utilizada.

Em primeiro lugar, o método de recarga a corrente constante consiste em aplicar uma corrente constante e uniforme durante o processo de recarga. Desta forma a tensão varia durante o processo. Este método normalmente resulta em longos tempos de carga, já que a corrente aplicada é de um modo geral baixa (0.1C) [5].

Em segundo lugar, o método de tensão constante consiste em aplicar uma tensão constante, onde a corrente de carga diminui ao longo do tempo, pois a resistência interna da bateria aumenta com o nível de carga de bateria. Este método apresentado na figura 3.3, é normalmente utilizado para manter a carga das baterias utilizadas em sistemas auxiliares de alimentação (UPS), também denominado de *float charging*. A tensão é mantida constante para evitar o processo natural de auto descarga das baterias [5].

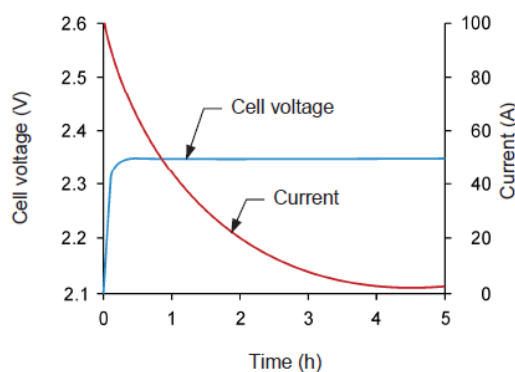


Figura 3.3: Método de recarga de tensão constante [5]

O método modificado de tensão constante apresentado em 3.4, utiliza ambos os métodos de tensão e corrente constante. A recarga da bateria inicia com uma corrente constante até que certa tensão seja atingida. De seguida a recarga continua com tensão constante e no final, a tensão é reduzida para uma *float charging*, tensão flutuante. Esta visa completar o processo de recarga e também manter o nível de carga da bateria [5].

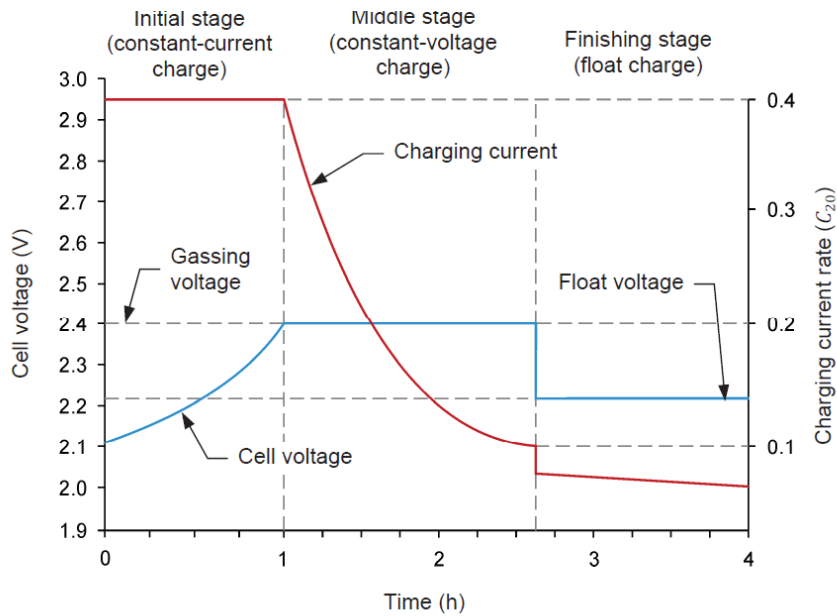


Figura 3.4: Método de recarga de tensão constante modificado [5]

3.4 Parâmetros relativos à condição da bateria

Para realizar a avaliação da condição de baterias, é necessário conhecer vários parâmetros que caracterizam o estado das mesmas. Estes parâmetros são essenciais para a estimação do índice de saúde de baterias.

3.4.1 Tensão de circuito aberto (OCV - "Open Circuit Voltage")

A tensão de circuito aberto (OCV) representa a tensão da bateria quando esta não tem nenhuma carga associada. A OCV depende da temperatura e do estado de carga da bateria [24]. A OCV revela elevada importância, pois pode ser usada para determinar o estado de carga da bateria [21]. É aconselhado que este parâmetro seja medido após um repouso de pelo menos 24 horas da bateria, para que o valor da OCV já esteja estabilizado [23].

3.4.2 Profundidade de descarga (DOD - "Depth of Charge")

A profundidade de descarga é um parâmetro importante para aprimorar qual o número de ciclos de descarga que ainda podem ser realizados por uma bateria, antes que esta deixe de cumprir

com as requisitos mínimos de funcionamento. Este parâmetro indica a percentagem da capacidade da bateria que foi descarregada, expressa como percentagem da capacidade máxima. Uma descarga de, pelo menos 80 por cento é vista como uma descarga profunda [21]. Para a maioria das baterias, descargas profundas frequentes para além do máximo recomendado, podem diminuir drasticamente a esperança de vida de uma bateria [21].

Na figura 3.5 é possível observar a relação da profundidade de descarga com o número de ciclos restantes para o fim de vida de uma bateria, neste caso em concreto trata-se de uma bateria de chumbo ácido de 24V/37Ah.

Depth of Discharge (% of Rated Capacity)	Number of Cycles to End of Life
10	2000
30	670
50	400
80	250
100	200

Figura 3.5: Profundidade de descarga em função do número de ciclos restantes para o fim de vida de uma bateria [4]

3.4.3 Resistência interna

A resistência interna caracteriza a capacidade da bateria suportar uma certa carga. Por norma, esta apresenta variação nos valores consoante a fase de carga ou descarga da bateria, idade e também dependendo do estado de carga da bateria. Sendo que a resistência interna diminui com o aumento do valor do estado de carga [21].

Ao longo da vida de uma bateria, a resistência interna vai aumentando e consequentemente, a eficiência da bateria diminui, visto que uma maior parte da energia está a ser convertida para calor [24].

3.4.4 Estado de carga e estado de saúde

O estado de carga (SOC - "*State of Charge*") e estado de saúde (SOH - "*State of Health*") são indicadores com elevada importância para os sistemas de gestão de baterias, geralmente usados como *inputs* para estes sistemas [25].

O SOC traduz a capacidade atual da bateria, ou seja, a quantidade de carga disponível da bateria, expressa como percentagem da capacidade nominal, normalmente descrita pelo fabricante. É análogo à quantidade de combustível que se encontra no depósito de um carro a um dado instante [26]. A partir deste indicador, é possível averiguar por quanto tempo é que uma bateria

pode fornecer energia [27]. Para melhorar a esperança de vida e funcionamento de uma bateria, é necessário que o estado de carga (SOC) seja mantido dentro de valores ótimos [25].

Por outro lado, o SOH representa uma medida da capacidade de uma bateria armazenar e fornecer energia elétrica, comparativamente com uma bateria nova. Este indicador baseia-se na observação de parâmetros específicos da bateria para determinar danos ou degradações internas da mesma [27]. No entanto, a definição do SOH de uma bateria ainda é um pouco ambígua, visto que podem ser utilizados diferentes parâmetros como indicadores do funcionamento da bateria. Esta ambiguidade torna a determinação do SOH uma tarefa difícil [10].

De um modo geral, a estimação destes indicadores é um processo complexo, visto estar sempre bastante dependente de medições de parâmetros específicos da bateria. Como os indicadores (SOH e SOC) não podem ser diretamente medidos, geralmente é difícil determina-los de forma precisa .

Deste modo, conseguir a manutenção do SOC de uma bateria num valor ótimo ou determinar quando é que o SOH já se encontra num valor em que o funcionamento da bateria foi significativamente afetado, torna-se um processo difícil [27]. A estimação do SOC e do SOH será considerada de forma mais pormenorizada mais à frente.

Ambos os parâmetros, embora de diferentes maneiras, representam o desempenho da bateria de uma forma idêntica, no entanto a sua relação direta não é linear. A determinação correta e autónoma destes indicadores simplifica bastante o processo de manutenção e substituição das baterias por parte da ORD.

3.5 Baterias utilizadas pela EDP Distribuição

Na ORD, os Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua (SACC) são constituídos por grupos de baterias que são fornecidos e instalados por empresas sub-contratadas. Quando é necessário adquirir um SACC novo, é realizado um concurso nacional onde as empresas apresentam as suas soluções. Posteriormente, é feita uma negociação com o objetivo de escolher a melhor opção em concordância com o custo, eficiência, segurança e manutenção dos ativos.

Nas subestações AT/MT da ORD encontram-se diversos tipos, marcas e modelos de baterias em funcionamento. Esta diversidade verifica-se, pois no momento de adquirir estes ativos, existem sempre diferentes soluções e variações das mesmas. De um modo geral, na ORD, existem em funcionamento três tipologias de baterias:

- Baterias de chumbo-ácido reguladas por válvula (VRLA- "*Valve-Regulated Lead-Acid*")

Modelo com Separador com micro fibras de vidro (AGM- "*Absorbent Glass Mat*")

Modelo com eletrólito de gel.

- Baterias de níquel-cádmio ventiladas (NiCd);

3.5.1 Baterias de chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido foram as primeiras baterias que podiam ser recarregáveis, inventadas em 1859 pelo eletroquímico francês Gaston Planté. Este produziu um rolo em espiral de duas folhas de chumbo, separadas por um fabrico de linho, imersas numa solução de ácido sulfúrico [28]. Com a necessidade crescente de baterias para diferentes aplicações, foram feitas várias melhorias ao longo dos anos relativamente à vida útil, fiabilidade e eficiência deste tipo de baterias.[29].

Convencionalmente, estas baterias necessitam de ser ventiladas durante o seu carregamento para libertação de gases. A consequência desta ventilação, prende-se com o facto destas só poderem ser utilizadas numa posição vertical, de outra maneira ocorreria uma fuga do eletrólito [22]. No entanto, com a invenção de baterias de chumbo-ácido ventiladas por válvulas (VRLA) em 1970, foi possível que estas fossem instaladas com qualquer orientação, abrangendo um maior número de aplicações em que poderiam ser utilizadas [28]. Este tipo de baterias trouxeram uma avanço considerável no mercado de baterias, visto que a eficiência é da ordem dos 95 a 99% [28].

As baterias de chumbo-ácido apresentam uma vantagem, relativamente a outros tipos de baterias, visto não sofrerem do efeito de memória ("*memory effect*"). Este efeito é caracterizado pela diminuição da capacidade máxima disponível, devido à frequente recarga da bateria após ter sido parcialmente descarregada [30, 31].

De um modo geral, este tipo de baterias são normalmente utilizadas em sistemas energéticos. No entanto, apresentam uma esperança de vida baixa e o seu processo de produção cria muitos resíduos poluentes. Desta forma, no futuro, as baterias de chumbo-ácido serão provavelmente substituídas por uma opção menos poluente [32].

No espectro das baterias de chumbo-ácido VRLA, existem dois modelos distintos, que se caracterizam pela forma como imobilizam o eletrólito [28]:

- Baterias com eletrólito de gel: A solução de ácido sulfúrico que compõem normalmente o eletrólito é misturada com sílica. Esta solução líquida transforma-se num gel quando aplicada nas células.
- Baterias com separador de micro fibras de vidro (AGM): A absorção do separador que é instalado entre o eletrodo positivo e negativo garante a imobilização do eletrólito. A estrutura porosa permite a passagem de oxigénio durante o processo de recarga até à placa negativa, reduzindo assim as perdas de água. Os separadores têm de estar em contato com as placas para reduzir a resistência interna da bateria

As principais vantagens e desvantagens das baterias VRLA estão descritas na tabela 3.1

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Pouca manutenção • Indicador SOC recolhido por medição de tensão em circuito aberto (OCV) [33] • Taxa de auto descarga baixa • Não sujeitas ao efeitos de memória mínimo [28] • Capacidade de funcionamento a taxas elevadas de descarga • Custo mais baixo comparativamente com baterias Ni-Cd [36] 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessários cuidados no processo de recarga • Tempo de vida baixo (menos 70% do projetado) [34] • Sensibilidade a temperatura elevada [35] • Ocorrência de fugas térmicas • Densidade de energia relativamente baixa

Tabela 3.1: Vantagens e desvantagens de baterias VRLA

Hoje em dia na ORD, as baterias de chumbo-ácido VRLA representam 10% das baterias em funcionamento nas subestações no norte do país. Em que, as baterias VRLA com eletrólito de gel representam 53% e as VRLA AGM representam 47%.

Uma das baterias VRLA de gel mais usadas na ORD é o modelo OPZV 200 da marca SUNLIGHT, representada na figura 3.6. As células desta bateria apresentam uma tensão nominal de 2V, uma capacidade de 213Ah a uma taxa de descarga de C/10 e eficiência na ordem dos 95% [37].



Figura 3.6: Bateria SUNLIGHT OPZV 200

Relativamente às baterias VRLA AGM, o modelo mais comum em funcionamento na ORD é o 12NDF100 da marca NARADA, representada na figura 3.7. Este modelo opera em condições ideais a 25°C, tem uma tensão nominal de 12V e uma capacidade de 100Ah a uma taxa de descarga C/10.



Figura 3.7: Bateria NARADA 12NDF100

3.5.2 Baterias de níquel-cádmio

Como as baterias de chumbo-ácido, as baterias de níquel-cádmio (NiCd) são um tipo de baterias de armazenamento, onde o produto do processo de eletrólise inclui hidrogénio e oxigénio [38]. A sua produção começou em meados do século 20 nos Estados Unidos, as baterias ventiladas eram chamadas de "*pocket plate*", construídas com placas de níquel e cádmio [22]. Este tipo de bateria é constituída por elétrodo positivo de hidróxido de níquel (ânodo), um negativo de cádmio (cátodo) e um eletrólito alcalino. Por vezes chamadas coloquialmente de "*nicads*"[38].

Ao longo dos anos foram conseguidas várias melhorias relativamente à eficiência, desempenho e peso das mesmas. As baterias de NiCd ventiladas, são o tipo tradicional de célula podendo ser utilizadas num grande número de diferentes aplicações. Progressos no desenvolvimento das mesmas, possibilitaram o fabrico de baterias de menores dimensões para equipamentos portáteis de manutenção [22].

Relativamente a aplicações industriais, as baterias NiCd, após as de chumbo-ácido, são as baterias recarregáveis mais utilizadas no mercado, sendo fabricadas com capacidades entre 5 e 1200 Ah. No entanto, também este tipo de baterias contém resíduos bastante poluentes, sendo estes bastantes prejudiciais para o meio ambiente [38].

Existem dois tipos de básicos de células que compõem as baterias NiCd [4]:

- Ventiladas: Neste tipo de células, os gases que são produzidos durante a recarga, como hidrogénio e oxigénio, são ventilados para o exterior da célula.
- Recombinantes: Este tipo de células é selada por uma válvula a uma pressão elevada, que só liberta gases em condições extremas. Apesar de serem seladas, é necessário tomar providências relativamente a eventuais fugas de gás.

Na tabela 3.2 estão descritas as principais vantagens e desvantagens das baterias níquel-cádmio [38]:

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Bom desempenho em temperaturas baixas • Fiável e com morte progressiva • Recarga muito rápida sem impor stress à bateria [39] • Menor custo que baterias de chumbo-ácido [36] • Bom desempenho mesmo em sobrecarga [28] • Tempo de vida elevado na condição de armazenamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza cádmio um metal tóxico • Densidade de energia baixa • Sujeitas ao efeito de memória (necessita descargas completas para recuperar capacidade) [40] • Taxa de auto descarga elevada (1%/dia a 20°C) [4]

Tabela 3.2: Vantagens e desvantagens de baterias NiCd

Atualmente na ORD, 90% das baterias em funcionamento nos SACC das SE no norte do país são do tipo níquel-cádmio ventiladas. O modelo mais utilizado é o SCL 221 da marca SAFT, representada na figura 3.8.

Esta bateria é uma bateria de níquel-cádmio ventilada, do tipo "*pocket plate*" já referido anteriormente. Apresenta uma capacidade nominal de 221Ah a uma taxa de descarga de C/5. [41]



Figura 3.8: Bateria SAFT SCL 221 [6]

3.6 Práticas de teste, manutenção e substituição de baterias

Existe uma necessidade crescente em estipular práticas para a manutenção, teste e substituição de baterias, visto que estas têm uma grande importância para a gestão destes ativos. Deste modo,

organizações como a IEEE ("Institute of Electrical and Electronics Engineers") fornecem práticas uniformizadas para assegurar o correto funcionamento dos diferentes tipos de baterias.

Embora os fabricantes de baterias já forneçam este tipo de informação, o desenvolvimento destas práticas uniformizadas ajuda bastante em certos processos referentes à manutenção, controlo de falhas e situações de emergência de baterias [42].

De um modo geral, vão ser descritas as diretrizes desenvolvidas pela IEEE associadas a baterias de chumbo-ácido VRLA bem como baterias níquel-cádmio ventiladas, sendo estas as utilizadas nos Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua (SACC) da ORD.

3.6.1 Baterias de chumbo-acido VRLA

No documento [42], estão descritas as diretrizes relativas às práticas recomendadas de manutenção, horário de testes, procedimento de testes e procedimento de substituição de baterias, que possam otimizar a vida e funcionamento de baterias de chumbo-acido reguladas por válvulas (VRLA), em sistemas auxiliares de alimentação. Estas práticas devem ser consideradas e comparadas com as condições operacionais, recomendações do fabricante, recursos e com a necessidade de desenvolvimento de um programa de manutenção para a aplicação em questão [43].

Em primeiro lugar, em [43] estão descritos os procedimentos, precauções e equipamento de proteção obrigatórios, necessários para qualquer procedimento de instalação e manutenção das baterias em questão.

Uma manutenção adequada prolonga a vida útil de uma bateria, bem como assegura que a capacidade de satisfazer os objetivos para que foi projetada sejam cumpridos. De outra forma, também serve de ajuda valiosa para determinar a elegibilidade de uma bateria para ser substituída. Desta forma, devem ser conduzidas inspeções periódicas (mensais, trimestrais, anuais) para monitorizar os grupos de baterias.

Nas inspeções mensais, descritas em [43], devem ser recolhidos dados como a tensão flutuante, corrente e tensão na saída do alimentador, temperatura ambiente e aspeto físico geral. Posteriormente, nas inspeções trimestrais, deve ser recolhido adicionalmente, a tensão individual e resistência interna em cada célula da bateria, bem como a temperatura do terminal negativo de cada célula. Finalmente, nas inspeções anuais, sendo estas aplicadas também para as inspeções iniciais (aquando da instalação da bateria), deve ser adquirida, a resistência interna detalhada de cada célula da bateria, bem como a corrente de *ripple* alternada que está a ser imposta na bateria [43].

Inspeções extraordinárias devem também ser conduzidas quando são registadas condições anormais de funcionamento da bateria, como descarga acentuada, sobrecarga ou temperatura ambiente extrema. Todas estas inspeções são compostas por ações corretivas no caso de serem registados parâmetros fora do normal [43].

Relativamente aos testes de autonomia e *performance*, estes são realizados para determinar se a bateria corresponde às especificações facultadas pelo fabricante. O registo destes testes, fornece informação capaz de prever o futuro funcionamento da bateria, bem como a elegibilidade para realizar a sua substituição.

Em [43] está descrita de uma forma detalhada, a metodologia necessária para a realização destes testes. A diretriz em cima referida, recomenda a realização de um teste no momento da instalação do ativo. Posteriormente, é recomendado que os ensaios sejam feitos com intervalos máximos de dois anos. Quando os ativos atingirem 85% da sua vida projetada ou mostrem sinais de degradação, devem ser conduzidos testes anuais [43].

O critério de substituição de baterias, recomenda que estas sejam substituídas quando a capacidade medida for inferior a 80% da capacidade nominal referida pelo fabricante, visto que esta perda de capacidade, demonstra que a taxa de deterioração está a aumentar, mesmo que as baterias consigam suportar a carga. No entanto, existem outros fatores que podem levar uma bateria a ser elegível para substituição, como testes de serviço insatisfatório, necessidade de adicionar novos requerimentos de carga e por fim, temperatura da bateria elevada [43].

Por conseguinte, é de realçar que toda a informação adquirida através destes processos, é essencial para assegurar o bom funcionamento das baterias, bem como manter a sua esperança de vida [43].

3.6.2 Baterias de níquel-cádmio (NiCd)

Em [44], estão presentes as diretrizes referentes às práticas recomendadas de manutenção, horário de testes, procedimento de testes e procedimento de substituição de baterias, que possam otimizar a vida e funcionamento de baterias de níquel-cádmio ventiladas em sistemas auxiliares de alimentação.

Tal como para as baterias de chumbo-ácido VRLA, em [44] estão descritos os procedimentos, precauções e equipamento de proteção obrigatórios, necessários para qualquer procedimento de instalação e manutenção das baterias de níquel-cádmio.

As inspeções trimestrais devem registar, a tensão flutuante aos terminais da bateria, a corrente flutuante, temperatura ambiente, aspeto geral e visual de todas os componentes da bateria, bem como do armários das mesmas. Semestralmente, a inspeção deve registar todos os parâmetros da inspeção trimestral e adicionalmente a tensão em cada célula da bateria. Já nas inspeções anuais, deve ser adicionalmente registado o torque das ligações entre células e condição e resistência dos cabos de ligação [44].

As inspeções extraordinárias seguem a mesma diretriz já descrita em 3.6.1, para as baterias de chumbo-ácido VRLA [44].

Relativamente aos testes de autonomia, em [44], refere que deve ser realizado um ensaio de descarga nos primeiro dois anos de serviço do ativo. Posteriormente, é recomendado a realização de ensaios com intervalos de cinco anos, até que a bateria demonstre sinais de perda excessiva de capacidade (capacidade da bateria diminuir mais de 1.5% por ano relativamente à capacidade registada no ano anterior). Finalmente, qualquer bateria que mostre sinais de perda excessiva de capacidade deve ser sujeita a testes de autonomia.

Em [44], encontra-se também descrita a degradação da capacidade de uma bateria de níquel-cádmio operando de 20°C a 25°C. É de notar, que a degradação é quase linear, apresentando uma perda de capacidade de 1% por ano durante quase toda a vida da bateria. Esta condição

demonstra que este tipo de baterias não apresentam nenhum ponto característico ou abrupto para a substituição das mesmas.

O critério de substituição recomenda que as baterias sejam substituídas quando estas revelarem resultados insatisfatórios nos testes de autonomia. É necessário que haja uma análise da *performance* da bateria, caso esta não seja capaz de suportar os equipamentos para que foi projetada [44].

3.7 Testes e ensaios periódicos realizados na ORD

A ORD fornece diretrizes às equipas de manutenção, para a realização de certos testes e ensaios necessários para a verificação da condição dos grupos de baterias. Estes ensaios, são denominados ensaios "MPS" e "MPS Medidas", sendo estes realizados aos grupos de baterias que suportam os serviços de uma Subestação a 110Vcc e 48Vcc, caso existam. Os relatórios "MPS" e "MPS Medidas" medidas encontram-se apresentados no Anexo A.

O relatório do ensaio, requer o registo do sistema de alimentação, fornecendo informações relativamente ao alimentador e baterias instaladas nos mesmos. Na figura 3.9 está representado o cadastro do sistema de alimentação.

Alimentador
Marca
Modelo
N.º Rectificadores
Número Série
Ano
Baterias
Marca
Modelo
N.º Elementos
Capacidade
Ano

Figura 3.9: Registo do sistema de alimentação

A realização deste relatório, deve ser acompanhada da consulta de toda a documentação técnica referente ao alimentador e baterias em questão. É importante referir que todas as anomalias detetadas durante a intervenção deverão ser solucionadas.

Inicialmente, a equipa de manutenção mede a tensão em regime flutuante (V) e a tensão em regime de reforço (V) do grupos de baterias, bem como a corrente (A) que está a ser fornecida pelo alimentador. Nesta fase da inspeção, a equipa realiza uma verificação visual do aspeto físico de todo o sistema, bem como o funcionamento das sinalizações locais, limpeza interior e exterior dos armários, aperto das ligações elétricas e do nível de eletrólito das baterias.

Após a verificação inicial, é realizado um teste de autonomia ao grupo de baterias. É realizado um ensaio de descarga de 30 minutos a uma taxa de descarga de C/5, equivalente à descarga de

10% da capacidade total do grupo de baterias. As tensões deverão ser monitorizadas de forma a respeitarem o limite mínimo de tensão por elemento, definido na *datasheet* da bateria.

Em primeiro lugar, são registados os valores de tensão e condutividade flutuante, enquanto o grupo de baterias se encontra ligado ao alimentador. Posteriormente, o grupo de baterias é então desligado do alimentador e ligado em série a uma unidade de descarga de baterias, para que a taxa de descarga seja de C/5. Após a conclusão da descarga, o grupo é posto em vazio, sendo registados os valores de tensão (V) final em vazio de cada elemento, bem como as polaridades positivas e negativas do alimentador em relação à terra.

Finalmente, é realizada uma verificação final após o ensaio de descarga, que repete a verificação visual realizada antes do mesmo, bem como as condições de ventilação e climatização do local onde o sistema de alimentação está instalado.

Adicionalmente ao relatório MPS, a equipa de manutenção realiza o relatório MPS medidas que consiste em medições individuais a todas as células dos grupos de baterias, onde são registados parâmetros como tensão, condutância ou resistência interna e temperatura. Estas medições são realizadas antes e depois do teste de autonomia.

De forma a que os dados não sejam influenciados pela instabilidade da bateria, é necessário que a última medição em vazio seja realizada após alguns minutos de descanso para que o grupo de baterias estabilize.

3.8 Equipamentos de medição e suporte

As medições realizadas aos grupos de baterias da ORD são feitas por equipas de manutenção. Para a sua realização, é necessário que as equipas possuam um dispositivo especializado que permita executar os ensaios e medições pretendidas.

O departamento de manutenção do norte do país, utiliza o EC2000, representado na figura 3.10, para realizar todas as suas medições. Este aparelho permite a medição precisa de parâmetros como tensão, impedância e condutância da bateria. Também é possível medir a capacidade atual da bateria, bem como a quantidade de capacidade perdida através de sulfatação. Quando é efetuada uma medição, todos os parâmetros ficam registados na memória do dispositivo e podem ser posteriormente exportados com o *software* IBMS [7].



Figura 3.10: EC2000 [7]

Por outro lado, no departamento de manutenção do centro e sul do país, as medições são realizadas por um multímetro FLUKE BT521, representado na figura 3.11, sendo este capaz de medir com precisão os mesmos parâmetros que 3.10 [8].



Figura 3.11: FLUKE BT521 [8]

Para o relatório MPS, é utilizado o modo de medição singular que permite a realização de medições rápidas sendo estas armazenadas na memória do aparelho. Já no relatório MPS medidas, é utilizado o modo de medição em sequência que se caracteriza pela possibilidade do utilizador criar um perfil, onde são inseridas todas as informações referentes ao grupo de baterias que está a ser testado. Posteriormente, podem ser realizadas medições sequenciais a todas as células da bateria, sendo estas exportadas através dos seus *softwares* específicos.

Capítulo 4

Algoritmos de estimação do índice de saúde de baterias

4.1 Introdução

Nos Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua (SACC), é essencial que os grupos de baterias que os incorporam apresentem um correto funcionamento e desempenho. Desta forma, é importante conseguir caracterizar a condição destes ativos da forma mais eficiente e precisa possível, para que se minimize o risco de falha. Os indicadores estado de carga (SOC) e estado de saúde (SOH), embora de difícil estimação, são utilizados para a gestão da maior parte dos sistemas de baterias associadas a aplicações de sistemas estacionários [45].

A estimação precisa destes dois indicadores, está associada às seguintes vantagens [46]:

- Assegurar um bom desempenho do grupo de baterias;
- Monitorização da condição das baterias;
- Prevenção da ocorrência de falhas nos sistemas da baterias;
- Fornecer informação essencial para a tarefa de substituição das baterias

Para efeitos de referência o índice de saúde vai ser substituído neste capítulo por estado de saúde (SOH), já que os artigos referenciados apresentam sempre este termo em vez de índice de saúde.

Existem três tipos diferentes de definições de SOH, incluindo valores de SOH baseados na impedância da bateria, na capacidade da bateria, e em parâmetros globais da bateria como impedância, capacidade, tensão de circuito aberto (OCV), corrente de carga e/ou descarga e temperatura.

Os SOH baseados na impedância da bateria e capacidade da bateria (SOC), refletem a capacidade da mesma para fornecer uma certa potência e para armazenar energia, respetivamente. No entanto, de um modo geral este tipo de estimacões apresentam um elevado custo financeiro e computacional, bem como uma elevada complexidade de desenvolvimento, especialmente estimacões *online*.

Relativamente à definição baseada em parâmetros globais da bateria, a dificuldade da sua aplicação depende sempre do número de parâmetros que vão ser utilizados para a estimação do SOH, bem como se esta vai ser desenvolvida *online* ou *offline* [10].

4.2 Estimação do estado de carga (SOC) e estado de saúde (SOH)

Uma grande parte dos algoritmos de estimação do SOH, utilizam o SOC como forma de cálculo do mesmo, geralmente pode ser representado pela equação 4.1, ou seja, a capacidade máxima de energia que uma bateria pode armazenar (C_{max}) expressa como função da sua capacidade nominal (C_{nom}) [25].

$$SOH = \frac{C_{max}}{C_{nom}} \quad (4.1)$$

Como já foi referido anteriormente, o SOC representa a capacidade atual de uma bateria, ($C_{disponivel}$) expressa como percentagem da sua capacidade nominal (C_{nom}) da mesma, representada na equação 4.2.

$$SOC = \frac{C_{disponivel}}{C_{nom}} \quad (4.2)$$

Quando uma bateria está a ser descarregada, a profundidade de descarga (DOD), representa a capacidade descarregada da bateria ($C_{descarregado}$), expressa como uma percentagem da capacidade nominal (C_{nom}), representada na equação 4.3.

$$DOD = \frac{C_{descarregado}}{C_{nom}} \quad (4.3)$$

Deste modo, sem considerar a eficiência e o envelhecimento da bateria, o SOC pode ser expresso desta forma 4.4.

$$SOC = 100\% - DOD \quad (4.4)$$

Assim, o SOC pode também ser representado como em 4.5.

$$SOC = SOH - DOD \quad (4.5)$$

A determinação destes indicadores, depende bastante do tipo de bateria em questão e da aplicação para a qual está a ser utilizada, sendo esta uma das principais tarefas de um sistema de gestão de baterias [46].

Atualmente, existem vários métodos com diferentes níveis de complexidade para estimar o SOC e o SOH de um sistema de baterias. Estes métodos podem ser divididos de forma generalizada em duas categorias: modelos de estimação baseados num modelo físico ou modelos de estimação não baseados num modelo físico [10].

Os primeiros, utilizam um modelo elétrico ou eletroquímico das células da bateria. De forma a melhorar a estimação, podem também adicionalmente ser utilizados observadores adaptativos ou um Filtro de Kalman Estendido (EKF). O principal problema neste tipo de estimação é o facto destes modelos poderem não ser os mais aproximados ao modelo real, logo torna-se sempre difícil verificar a sua validade. Em baixo estão representados alguns exemplos de métodos baseados em modelos físicos da bateria [10]:

- Medição de tensão em circuito aberto (OCV)
- Baseado em ensaios de carga e descarga
- Medição da resistência interna
- *Coulomb Counting*
- Espetroscopia da impedância
- Filtro de Kalman (KF) / Filtro de Kalman estendido (EKF)

Por outro lado, nos métodos que não são baseados em modelos físicos da bateria, são normalmente medidos alguns dos parâmetros da bateria (impedância, temperatura, corrente de carga e/ou descarga, SOC), sendo estes utilizados como variáveis de entrada.

Estes métodos conseguem encontrar sinalizações e perceber o comportamento da bateria (fase da aprendizagem), através de um registo de dados passados dos parâmetros da mesma. Posteriormente, é possível obter estimações com bastante precisão dependendo da dimensão de dados passados existentes.

No entanto, para a implementação destes métodos é necessário um esforço financeiro e computacional elevado, bem como a necessidade de existir um registo grande de dados passados da bateria, tornando estes métodos de difícil implementação. De seguida estão representados alguns destes métodos [10]:

- Redes neuronais artificiais (ANN)
- Lógica Fuzzy

4.2.1 Método tensão em circuito aberto (OCV)

O método baseado na tensão em circuito aberto (OCV) é um dos métodos mais simples e com um custo bastante reduzido, no entanto não apresenta a mesma precisão que os restantes. A implementação deste método, é dependente da existência de uma regressão linear que relacione a OCV com o SOC ou SOH da bateria.

De um modo geral, os fabricantes destes ativos já disponibilizam esta relação, no entanto a tensão é normalmente bastante afetada pela temperatura, logo é possível que a estimação seja ligeiramente comprometida. Para compensar este problema, pode ser feita uma correção à medição

da tensão em circuito aberto (OCV), construindo também uma regressão linear que relacione a OCV com a temperatura [25].

Estas relações são normalmente disponibilizadas pelos fabricantes destes ativos, no entanto a forma mais precisa, embora mais trabalhosa de conseguir estas relações, seria simular o modelo da bateria experimentalmente [25].

Em [47], são descritas várias abordagens para determinar a relação entre OCV e SOC em baterias de lítio. Estas são conseguidas através de ensaios sucessivos de cargas e descargas das baterias, utilizando equipamento especializado para teste de baterias que armazenam todos os dados referentes aos ensaios. Utilizando modelos precisos das baterias, a relação entre a OCV e o SOC é então conseguida através dos dados obtidos nos ensaios. Posteriormente, para obter valores do SOC, basta realizar uma medição da tensão OCV e utilizar a relação estabelecida.

Na figura 4.1, estão representados os resultados obtidos em [9] referentes à relação entre OCV e SOC.

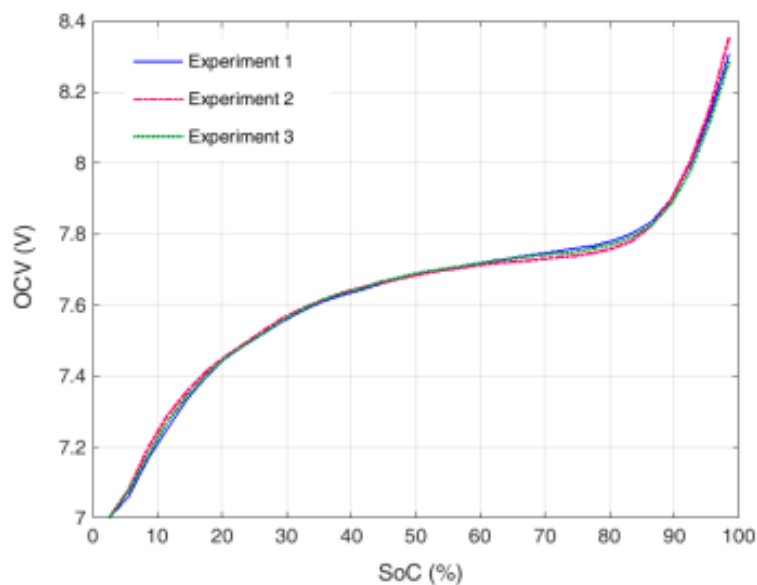


Figura 4.1: Relação entre OCV e SOC [9]

Para que este método seja fiável, é necessário que a bateria esteja em repouso durante algumas horas antes que a medição da OCV seja realizada, visto ser necessária uma tensão estável [25].

4.2.2 Método baseado em ensaios de carga e descarga (tensão de descarga)

O SOC e o SOH de uma bateria, pode também ser determinado através de ensaios de descarga em condições controladas. Tal como o método anterior, a implementação deste método pode ser conseguida, utilizando diretamente uma regressão linear que caracterize a relação entre a tensão de descarga e o SOC, geralmente disponibilizada pelos fabricantes. No entanto, a tensão está sujeita a variações dependendo de certos parâmetros como a temperatura, humidade, corrente de

carga e/ou descarga, taxa de descarga, comprometendo de certa forma a estimação do SOC e consequentemente o SOH [25].

Em [10], são realizados ensaios sucessivos e completos de carga e descarga com diferentes taxas de carga (0.5C 1C 1.6C) e como método de recarga de corrente constante. A partir dos dados destes testes, foi possível conseguir a relação entre a tensão de descarga e o SOC, representado na figura 4.2 Desta forma, para futuramente estimar o SOC deste tipo de baterias, basta realizar uma descarga parcial da bateria, recolhendo os valores da tensão de descarga e calculando o SOC utilizando a regressão linear construída.

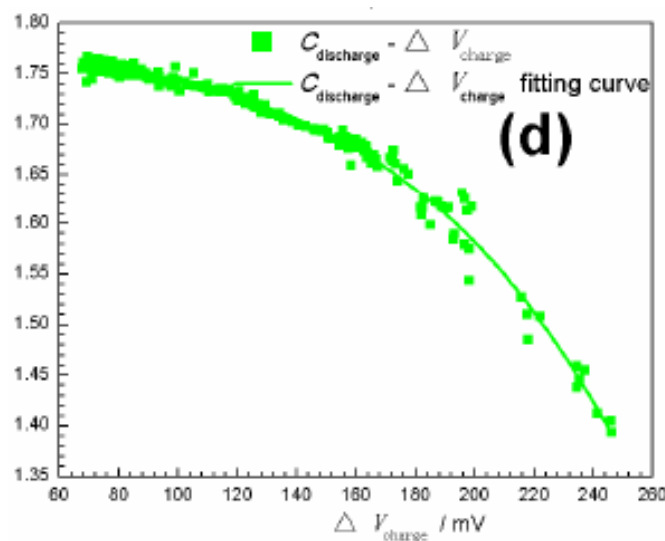


Figura 4.2: Relação entre tensão de descarga e SOC [10]

Estes ensaios foram realizados em condições específicas, sendo que para futuras estimações do SOC e SOH, é necessário que as mesmas se verifiquem.

É de notar, que para a construção desta relação entre o SOC e a tensão de descarga, é necessária a realização de uma grande quantidade de ensaios completos de carga e descarga e a relação só poderá ser utilizada para este modelo de bateria em específico.

4.2.3 Método baseado na medição da resistência interna

O método baseado na resistência interna é normalmente utilizado para estimar o SOC e SOH de uma bateria. Este parâmetro é dependente do SOC, temperatura e idade de uma bateria, sendo que a resistência tende a aumentar com idade de uma bateria.

Geralmente, a resistência interna é definida pela queda de tensão de uma bateria, quando lhe é aplicada uma certa corrente. Logo, a técnica mais simples para a sua determinação será aplicar uma corrente de descarga e medir a variação da tensão resultante. Posteriormente, realiza-se a divisão entre a variação de tensão e a variação da corrente, obtendo a resistência interna. No

entanto, aspetos como a queda de tensão não ser constante ou a corrente que está a ser aplicada ter um comportamento não linear, faz com que esta técnica tenha sempre um erro considerável [48].

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_1 - V_0}{I_1 - I_0} \quad (4.6)$$

Atualmente existem vários dispositivos capazes de estimar com alguma precisão a resistência interna de uma bateria [7]. É de realçar, que a condutância é também um parâmetro que pode ser medido por estes equipamentos e também utilizado para estimação do SOH, visto que este é o inverso da resistência interna.

Por conseguinte, adquirindo registos da resistência interna em diferentes fases da vida de uma bateria, é possível que seja construída uma relação entre o (SOH) e a resistência interna medida através de uma regressão linear. Posteriormente, para obter uma avaliação do SOH da bateria, basta realizar a medição da resistência interna.

4.2.4 Método de *Coulomb Counting* e *Enhanced Coulomb Counting*

O método de *Coulomb Counting*, é geralmente utilizado para a determinação do SOC de uma bateria, também denominado como contagem de Ampere-hora. Este método utiliza leituras da corrente aplicada na bateria, sendo esta integrada ao longo do tempo de utilização. A equação utilizada é dada pela equação 4.7, onde o $SOC(t_0)$ representa o SOC inicial, C_{nom} a capacidade nominal, I_b a corrente aplicada na bateria e I_{perdas} a corrente consumida pelas reações de perdas [46].

$$SOC = SOC(t_0) + \frac{1}{C_{nom}} \int_{t_0}^{t_0+\tau} (I_b - I_{perdas}) dt \quad (4.7)$$

Tendo acesso a capacidade inicial da bateria, o método calcula a capacidade da bateria em tempo real, integrando as correntes de carga e descarga durante o seu período de funcionamento. No entanto, o desempenho deste método está sempre dependente da precisão das medições de corrente, necessitando de sensores bastante precisos para que a estimação seja adequada. Podem também ocorrer alguns *offsets* na estimação caso o SOC inicial não seja conhecido com precisão.

Adicionalmente, é necessário ter em atenção as perdas que ocorrem durante o ciclo de carga e descarga da bateria. Estas perdas, associadas ao processo de auto descarga de uma bateria, causam erros acumulativos que podem comprometer a estimação a longo prazo. Deste modo, para uma estimação do SOC com bastante precisão, é necessário ter todos estes fatores em consideração [25].

De modo a fazer face aos erros acumulativos deste método, é também utilizado um método melhorado denominado *Enhanced Coulomb Counting*, onde são introduzidas correções sobre a eficiência de funcionamento da bateria (relativo às perdas) e é feita uma recalibração dinâmica do SOC da bateria.

Em [11], são realizados ensaios a baterias, onde são implementados e comparados estes dois métodos de estimação de SOC. Na figura 4.3 estão representados os resultados deste documento,

onde estão presentes os erros associados a cada um dos métodos, sendo estes com ou sem correção, associados aos métodos de *Enhanced Coulomb Counting* e *Coulomb Counting*, respetivamente.

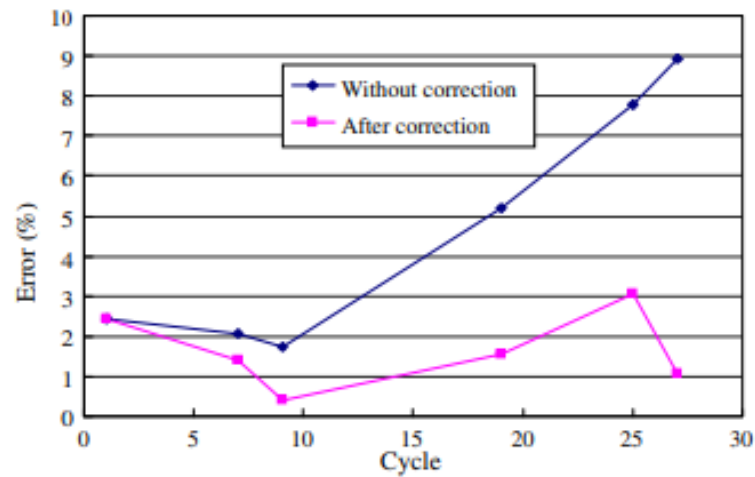


Figura 4.3: Estimação dos erros de diferentes métodos de *Coulomb Counting* [11]

Em [49], são realizados ensaios utilizando o método de *Coulomb Counting* incorporando também um Filtro de Kalman (KF) para corrigir os erros e *offsets* a que este método está sujeito. Foi concluído que, com a ajuda de um KF, é possível corrigir estes erros, resultando numa estimação do SOC com uma precisão bastante mais elevada do que o método de *Coulomb Counting*.

É de realçar que este método implica um custo financeiro elevado, bem como computacional, no caso de incorporação do KF. O KF será tido em consideração de forma mais pormenorizada mais à frente.

4.2.5 Método da espectroscopia eletroquímica da impedância (EIS)

A espectroscopia eletroquímica da impedância também conhecida por EIS, ("*Electrochemical Impedance Spectroscopy*") é uma técnica bastante eficiente de determinação do SOC e SOH. Tal como muitos outros métodos, é necessário construir uma relação entre a impedância e o SOC ou o SOH, dependendo do objetivo.

Deste modo, é necessário conduzir vários ensaios para perceber qual o comportamento da bateria em diferentes fases da sua vida. Geralmente, é necessário utilizar um equipamento, capaz de analisar a impedância a diferentes frequências durante um ensaio de carga e descarga de uma bateria. Os resultados desta medição são geralmente apresentados na forma de um diagrama de Nyquist, representado na figura 4.4.

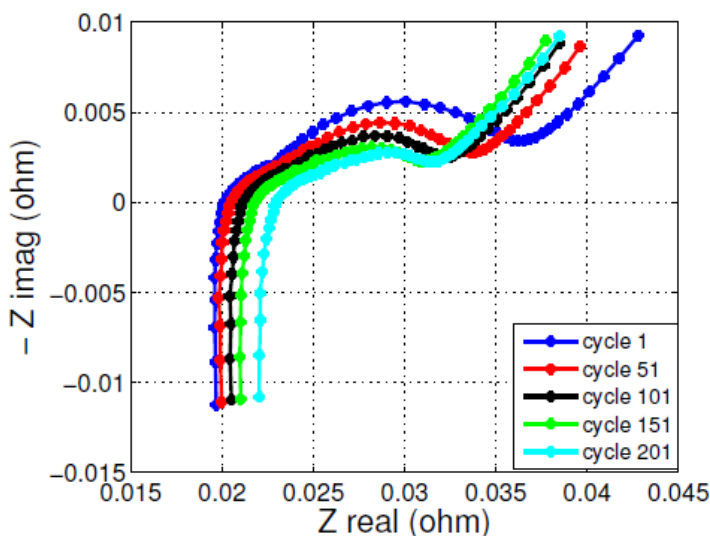


Figura 4.4: Espectro da impedância de uma bateria em diferentes números de ciclos (fase de vida) [12]

Posteriormente para realizar a análise dos dados recolhidos na medição, é necessário utilizar um modelo aproximado da bateria em estudo, de forma a criar uma relação entre a impedância e o SOC ou SOH da bateria. A impedância de uma bateria diminui com o aumento do SOC [50].

Este processo pode ser implementado de forma *online* ou *offline*, no entanto desenvolver um sistema *online* de medição EIS é uma opção com um custo e tempo de implementação muito elevados [51]. É de notar, que uma relação construída entre a impedância e o SOC ou SOH de uma bateria, só pode ser utilizada para esse modelo específico de baterias.

4.2.6 Métodos que incorporam Redes Neurais Artificiais (ANN)

As redes neurais artificiais (ANN) são utilizadas num elevado número de aplicações. Esta técnica tem vindo a ser implementada em aplicações de estimação de SOC e SOH de baterias, visto que para a integração desta não ser necessário um conhecimento profundo do modelo do sistema. Adicionalmente, esta é uma das soluções mais robustas quando implementadas corretamente.

Quando treinada de forma apropriada, uma rede neuronal é capaz de lidar com dinâmicas não lineares de uma bateria. Desta forma, sistemas complexos com dinâmicas internas complicadas, podem ser facilmente modelados por uma rede neuronal, não sendo necessário ter conhecimento do mecanismo interno da bateria, nem do seu modelo [52].

De um modo geral, as ANN são capazes de estimar parâmetros que não podem ser adquiridos por medição, como o SOC, através de outros que podem ser adquiridos com uma simples medição, como a tensão em circuito aberto (OCV) ou a tensão de descarga. No entanto, para conseguir tal, é necessário a existência de dados reais para treinar a rede. Estes são normalmente conseguidos experimentalmente ou através de modelos aproximados da bateria.

Posteriormente, estes dados vão ser utilizados como entradas e saídas da rede neuronal, para que a fase de aprendizagem seja concluída com sucesso, como representado na figura 4.5. Uma vez terminada a fase de aprendizagem consoante o erro mínimo pretendido, a Rede Neuronal necessita de ser validada em situações de estimação real [13, 53].

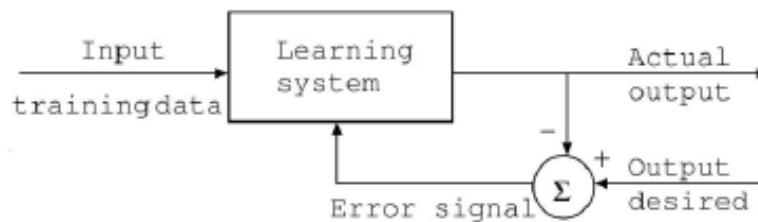


Figura 4.5: Diagrama de blocos relativos à fase de treino de uma Rede Neuronal [13]

Como foi referido anteriormente, para treinar a rede é necessário gerar dados através de um modelo ou adquiri-los experimentalmente. O tipo de dados gerados por um modelo é um fator muito importante para o treino da rede. Estes devem conseguir descrever todas as características da bateria, para que a rede consiga estimar o SOC ou SOH com precisão.

A escolha dos parâmetros que vão ser utilizados como entradas do sistema, é também uma escolha importante, visto que quantos mais parâmetros a rede tiver em consideração, mais precisa vai ser. No entanto é necessário haver um compromisso entre a quantidade de entradas e a complexidade da rede [54].

Em [54], é utilizado o tempo e a corrente como principais entradas e o SOC como saída, no entanto é recomendado adicionar parâmetros de entrada como a tensão, resistência interna e gravidade específica para tornar a rede mais precisa e coesa. Analisando os resultados deste projeto desenvolvido em baterias de níquel-cádmio, foi possível observar erros que atingiam os 10%, principalmente quando ocorriam variações bruscas do SOC.

Em [13], é utilizada a tensão e a corrente, bem como os valores das mesmas em pontos temporais anteriores. Deste modo, permite que a rede neuronal tenha em consideração a relação das quedas de corrente e de tensão relativamente ao SOC. Na figura 4.6 estão representados os resultados finais da validação da rede neuronal de [13]. Após 2000 ciclos de treino, a rede neuronal apresenta erros muito baixos comparativamente com o SOC real. De notar que o SOC real foi obtido através de *Coulomb Counting*, utilizando sensores de corrente e tensão muito precisos.

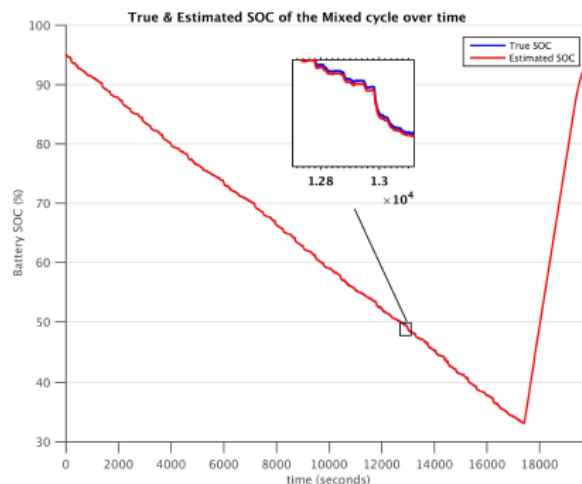


Figura 4.6: Validação da rede neuronal para estimação de SOC, relação entre SOC real e SOC estimado [13]

4.2.7 Métodos que incorporam sistemas de lógica difusa Fuzzy

O controlo Fuzzy é um sistema baseado em lógica difusa, que analisa entradas normalmente analógicas como variáveis lógicas, tomando valores entre 0 e 1. Este tipo de controlo proporciona um método de categorizar as variáveis com uma representação linguística, substituindo o tradicional método da representação numérica.

A representação linguística torna a modelação de um sistema, uma tarefa mais intuitiva e aproximada ao pensamento humano. Deste modo, os dados de entrada associados ao índice de saúde de uma bateria, podem ser classificados como "pouco saudável", "razoável", "saudável", facilitando bastante o desenvolvimento de algoritmos e interpretação dos dados.

De um modo geral, cada variável de entrada e saída, é caracterizada por funções que traduzem o comportamento do sistema. Desta forma, não é necessário o conhecimento e interpretação de modelos matemáticos complexos para modelar um sistema [55].

Posteriormente, são utilizadas regras que visam modelar as variações dos parâmetros do sistema, sendo que uma simples regra pode aproximar com precisão várias dinâmicas não lineares de um sistema [14].

Em [14], é desenvolvido um modelo para baterias baseado em lógica Fuzzy, tendo como entradas o seu SOC e temperatura e saída a tensão da bateria. Em primeiro lugar, através de um modelo de circuito equivalente da bateria, são adquiridos parâmetros gerais (tensão em circuito aberto (OCV), resistência interna) relacionados com a variação do SOC e da temperatura da bateria. Também são realizados alguns ensaios experimentais para corroborar o modelo de circuito equivalente.

Posteriormente são construídas regras que caracterizam as variações presentes nas relações anteriormente construídas. Tal como nos métodos que incorporam redes neurais artificiais (ANN),

é necessário que os dados adquiridos consigam descrever a maior parte das características da bateria. Algumas regras estão representadas na figura 4.7, neste caso em concreto relacionando o SOC com a resistência interna [14].

Rule¹: IF *SOC* is (*SOC* ≤ 0.04), THEN $R_s = R_{s1(soc)}$;

Rule²: IF *SOC* is (*SOC* = 0.06), THEN $R_s = R_{s2(soc)}$;

Rule³: IF *SOC* is (*SOC* = 0.09), THEN $R_s = R_{s3(soc)}$;

Rule⁴: IF *SOC* is (*SOC* ≥ 0.2), THEN $R_s = R_{s4(soc)}$.

Figura 4.7: Regras Fuzzy que determinam as funções de relação entre SOC e resistência interna [14]

Através destas regras, é então possível construir as funções que caracterizam a variação do SOC com a resistência interna, demonstrada na figura 4.8.

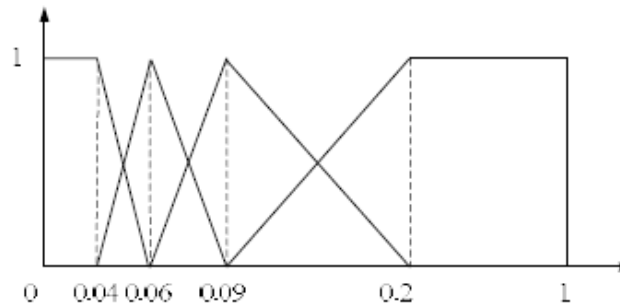


Figura 4.8: Funções do SOC para para cada intervalo do valor de resistência interna [14]

Finalizando todas as funções referentes às entradas e saídas do modelo Fuzzy pretendido, é necessário realizar a validação com ensaios reais ao modelo Fuzzy desenvolvido. Neste caso em concreto, foram realizados ensaios a diferentes temperaturas, variando o SOC. Na figura 4.9 está representada a comparação entre a tensão do modelo Fuzzy com a tensão real da bateria, a 30°C. É possível observar que o erro entre ambas é muito baixo. [14]

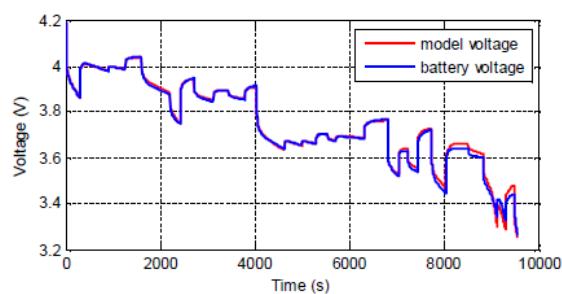


Figura 4.9: Validação do modelo Fuzzy desenvolvido em [14], relação entre a tensão do modelo e a tensão real da bateria

A lógica Fuzzy é um método bastante robusto e apresenta uma elevada capacidade de lidar com incertezas e imprecisões de um modelo real de uma bateria [13]. Deste modo, esta é uma solução bastante adequada para a estimação do SOC ou SOH de uma bateria. No entanto, este método apresenta uma dificuldade de implementação e esforço computacional muito elevados, logo é necessário que haja um compromisso entre estes e a precisão pretendida [56].

4.2.8 Método que incorpora Filtro de Kalman (KF) ou Filtro de Kalman Estendido (EKF)

O Filtro de Kalman (KF) é um estimador aplicado a sistemas lineares, que tem sido bastante utilizado na estimação do estado de carga (SOC) de baterias. Geralmente associado a métodos que envolvam medições diretas, como o método de *Coulomb Counting*.

Para a implementação deste filtro é sempre necessário utilizar um modelo descritivo da bateria, num sistema de espaço de estados, sendo que este filtro tem a capacidade de estimar o estado seguinte do sistema, bem como fornecer informação referente o erro associado da estimação. Desta forma, o KF é um método bastante eficiente quando utilizado para lidar com dados de medições que contêm ruído [57].

A estimação é realizada em duas fases, na primeira é estimado o estado seguinte e o erro da estimação. Posteriormente, é feita uma comparação entre os valores medidos e os valores estimados, sendo por fim corrigidos os erros relativos à estimação [57].

O KF é ótimo quando aplicado a sistemas lineares, visto que o modelo de descarga de uma bateria não segue uma distribuição linear, este filtro não é ideal para estimar os parâmetros da bateria. Deste modo, o Filtro de Kalman estendido (EKF) segue o mesmo princípio que o KF, no entanto está adaptado para sistemas não lineares [25]. Este método tem sido bastante utilizado em aplicações que beneficiam de processamento de dados em tempo real, que é o caso da estimação de parâmetros de uma bateria [58].

A aplicação do KF e EKF a sistemas de estimação de SOC, é normalmente associado ao método de contagem Ampere-hora (*Coulomb Counting*). Como foi referido anteriormente, o método de *Coulomb Counting* sofre erros acumulativos e offsets relacionados com a precisão do sensor

utilizado e precisão do SOC inicial de referência. Desta forma, o EKF é bastante utilizado para correção destes erros, tornando o método de *Coulomb Counting* um dos mais precisos na estimação do SOC [15].

Na figura 4.10 estão representados os resultados de [15], que compara a estimação de contagem Ampere-hora com e sem EKF. É possível observar que o filtro consegue corrigir os erros inerentes ao métodos de contagem Ampere-hora.

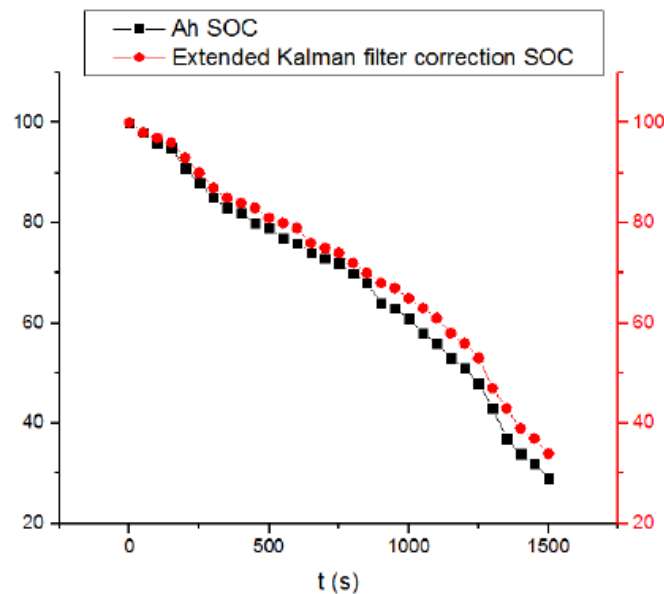


Figura 4.10: Comparação do método *Coulomb Counting* com e sem Filtro de Kalman Estendido, na estimação do SOC [15]

4.3 Comparações gerais entre os diferentes métodos de estimação do SOC e SOH

Atualmente, existem vários métodos para a estimação do SOC e SOH, e todos eles apresentam vantagens e desvantagens consoante a aplicação para que vão ser utilizados.

Os métodos que não são dependentes de um modelo da bateria para estimação de SOC e SOH como, a Lógica Difusa Fuzzy e Redes Neurais Artificiais (ANN), apresentam uma elevada robustez e precisão na estimação destes indicadores. No entanto, para a sua implementação é necessário uma elevada capacidade de processamento computacional, a necessidade de existir um elevado número de registo de dados históricos da bateria, bem como um tempo de implementação considerável.

O método da Espetroscopia Eletroquímica da Impedância (EIS) é também uma técnica de estimação do SOC e SOH bastante precisa, especialmente do SOH. No entanto, esta forma de medição da impedância, é uma abordagem que demora muito tempo a ser realizada (especialmente

a frequências baixas). Adicionalmente, é necessário equipamento específico para a realização destas medições, bem como um conhecimento complexo do modelo da bateria em questão

Por outro lado, o método de tensão em circuito aberto (OCV), apoia-se em simples medições da tensão em vazio. Desta forma, uma regressão linear que relacione a OCV com o SOC pode ser utilizada para estimar o SOC, e consequentemente avaliar o SOH de uma bateria. Contudo, este método apresenta a desvantagem de ser necessário que a bateria esteja sem carga durante algumas tempo para que a sua OCV estabilize e seja medida com precisão. Esta desvantagem, faz com este método possa não ser viável para um grande número de aplicações.

Tal como o método da OCV, o método baseado em ensaios de descargas, apoia-se em medições da tensão durante um ensaio de descarga. Desta forma, o SOC de uma bateria pode ser conseguido utilizando uma relação entre a tensão de descarga e o SOC. No entanto, para ser conseguida uma estimação do SOC é necessário que seja realizada uma descarga completa à bateria. Dependendo do tipo de baterias, este procedimento pode demorar algumas horas e consequentemente torna-se inviável para certas aplicações. Existe também uma elevada perda de energia por parte da bateria, quando são realizados ensaios de descarga completa.

A medição da resistência interna de uma bateria é também um método bastante simples para determinação do SOC e SOH, que pode ser caracterizado por uma simples regressão linear. Aspectos como a queda de tensão não ser constante ou a corrente que está a ser aplicada ter um comportamento não linear, faz com que esta técnica tenha sempre um erro considerável. No entanto, se não existirem recursos para a implementação de métodos mais precisos, a medição da resistência interna é uma opção bastante viável.

Por último, o método de *Coulomb Counting*, é um dos métodos mais utilizados para estimação do SOC. Tendo a vantagem de não necessitar de utilizar do modelo da bateria, este método apresenta uma precisão considerável. No entanto, como já foi referido anteriormente, é necessário ter em atenção a ocorrência de erros acumulativos e a dependência da precisão do sensor de corrente utilizado. Também é necessário realizar recalibrações constantes. Para que o SOC seja estimado com uma precisão elevada, pode também ser utilizado o Filtro de Kalman (KF) ou Filtro de Kalman Estendido (EKF) associado ao método de *Coulomb Counting*. Desta forma, os erros acumulativos, erros do sensor e a eventual necessidade de recalibração, podem ser evitados. Contudo, para implementação do KF ou EKF já é necessário o conhecimento do modelo da bateria. Adicionalmente, estes filtros necessitam de um esforço computacional muito elevado.

4.4 Conclusões

É possível verificar que existem diferentes algoritmos para estimação de SOC e SOH, cada um com diferentes níveis de complexidade de implementação, custo e precisão. É de notar que a escolha do método a utilizar, depende sempre da aplicação para a qual vai ser implementado.

No contexto da Operadora da Rede de Distribuição (ORD), é necessário optar pelo método que se adeque às necessidades e recursos da mesma. Atualmente, a ORD apresenta em funcionamento nas suas infraestruturas, diferentes tipos, marcas e modelos de baterias. Desta forma,

o algoritmo de estimação de índice de saúde terá que conseguir adaptar-se a todos os tipos de baterias existentes.

Deste modo, é necessário ter em consideração quais os custos (custos financeiros e custos de manutenção) associados à implementação deste algoritmo. Logo alguns métodos descritos anteriormente não vão poder ser implementados.

No caso do método da espectroscopia eletroquímica da impedância, método de *Coulomb Counting* e Filtro de Kalman (KF) / Filtro de Kalman Estendido (EKF), os custos associados à sua implementação em todas as Subestações da ORD seriam muito elevados, embora apresentem uma boa precisão de estimação.

Para a implementação das Redes Neurais (ANN) e Lógica Fuzzy num sistema de estimação de SOC ou SOH é necessário que haja um elevado poder computacional e também a criação de um modelo Fuzzy e Rede Neuronal para cada tipo marca e modelo de bateria, o que torna estas opções ilegíveis. Adicionalmente, para as ANN seria necessário a existência de um registo de dados históricos dos parâmetros das baterias com uma elevada dimensão para que a Rede pudesse ser desenvolvida.

O método da medição da tensão em circuito aberto (OCV) não é viável, pois seria necessário deixar os grupos de baterias sem carga pelo menos durante algumas horas, para que a estimação tivesse alguma precisão. Este cenário não seria possível, pois as baterias necessitam de estar sempre conectadas ao alimentador para compensar uma eventual falha na rede.

Relativamente ao método baseado em ensaios de descarga, é um dos métodos elegíveis para ser implementado na ORD, visto já ser realizado um ensaio de descarga parcial (10%) semestralmente. No entanto, a ORD apresenta muitos tipos, marcas e modelos de baterias. Deste modo seria necessário ter o conhecimento da relação entre a tensão de descarga e o SOC ou o SOH de todos estes tipos de baterias, algo que nem todos os fabricantes fornecem.

Seria necessário realizar ensaios experimentais reais ou utilizar modelos de cada tipo de baterias, para adquirir uma regressão linear entre a tensão de descarga e o SOC ou SOH das baterias. Esta solução não seria viável devido aos recursos e tempo necessário para o seu desenvolvimento.

Uma possível solução seria um ensaio de descarga completa, onde seria possível adquirir o valor do SOC com alguma precisão e consequentemente do SOH, no entanto uma descarga completa demora entre 5 a 6 horas, o que também acarretaria custos elevados para a ORD.

Por fim, embora com algumas desvantagens já descritas anteriormente, o método de medição da resistência interna é elegível de ser implementado nos ativos da ORD. Uma vez que nas inspeções semestrais (MPS) às baterias da ORD já é medida a condutância, o inverso da resistência interna, este método pode ser relevante para o desenvolvimento de um algoritmo de estimação de índice de saúde.

Capítulo 5

Análise e descrição dos algoritmos EDP-IS e EDP-IS-2018

5.1 Introdução

Neste capítulo vai ser descrito o algoritmo desenvolvido para a estimação do índice de saúde de baterias, denominado "algoritmo EDP-IS-2018". O desenvolvimento deste algoritmo foi baseado no algoritmo atualmente utilizado pela Operador de Rede de Distribuição (ORD), denominado por motivos de referência "algoritmo EDP-IS". Desta forma, vão ser descritos todos os parâmetros utilizados pelo algoritmo EDP-IS-2018, bem como toda a metodologia inerente ao mesmo.

5.2 Algoritmo EDP-IS atualmente utilizado na ORD

Na ORD, os gestores dos sistemas de baterias são responsáveis por diferentes funções dentro do departamento de manutenção. Uma das quais, é o preenchimento anual de um relatório de criticidade que visa ordenar e classificar todos os grupos de baterias, consoante o seu índice de saúde, para que sejam realizadas propostas de renovação destes ativos de forma priorizada.

Neste relatório de criticidade, existe uma secção referente aos grupos de baterias, onde os gestores preenchem manualmente vários campos relativos às características das baterias (idade, tipo, marca, capacidade, número de elementos), observações e também medições resultantes dos relatórios MPS e MPS Medidas. Os relatórios MPS e MPS Medidas encontram-se apresentados no Anexo [A](#).

Posteriormente é calculado o índice de saúde de cada grupo de baterias, expressa numa escala de 0% a 100%, ficando assim ordenados consoante o seu índice de saúde.

5.2.1 Descrição do algoritmo EDP-IS

O algoritmo EDP-IS, encontra-se incorporado neste relatório de criticidade. Este é composto por 4 parâmetros, entre eles a idade da bateria, a tensão individual dos elementos após uma descarga de 10% e a corrosão dos armários e baterias. Sendo que a cada parâmetro é atribuído um

peso, como está representado na tabela 5.1.

Parâmetros	Pesos
Idade	25%
Tensão	55%
Corrosão dos armários	10%
Corrosão das baterias	10%

Tabela 5.1: Pesos dos parâmetros do algoritmo de estimação do índice de saúde da ORD, EDP-IS

O cálculo do índice de saúde é obtido através do produto entre os parâmetros e o seus respectivos pesos. Sendo que quando o peso de um parâmetro é máximo, simboliza o correto funcionamento e plena saúde da bateria relativamente ao parâmetro em questão. Por outro lado, quando é atribuído o peso mínimo a um parâmetro da bateria, este simboliza o incorreto funcionamento e ausência de saúde da mesma, relativamente ao parâmetro em questão.

Quando o parâmetro da tensão apresenta um peso máximo, este traduz-se num peso de 55%. Por outro lado, quando parâmetro da tensão apresenta um peso mínimo, o seu peso será de 0%.

5.2.1.1 Idade do grupo de baterias

A idade de um grupo de baterias possui um peso algorítmico de 25%, fazendo esta distinção entre grupos compostos por baterias de níquel-cádmio e chumbo-ácido. Deste modo, cada tipo de grupo de baterias é caracterizado por uma função exponencial, onde é traduzido o seu peso percentual para a estimação do índice de saúde final. Estas funções traduzem a degradação dos sistemas de baterias, sendo estes baseados na análise de resultados passados do comportamento de cada tipo de grupo de baterias.

Na figura 5.1, estão representadas as funções matemáticas relativas aos dois tipos de grupos de baterias. O eixo das coordenadas representa a idade do grupo de baterias, expressa em anos. Finalmente, o eixo das ordenadas representa a degradação do grupo de baterias, expressa em percentagem.



Figura 5.1: Degradação dos grupos de baterias relativamente à idade do grupo

Posteriormente para obter o valor final do peso algorítmico da idade, é necessário subtrair a 100% o resultado da função, para obter o índice de saúde (inverso da degradação). Por fim, é realizado o produto entre este valor e o respetivo peso algorítmico total do parâmetro em questão (25%).

5.2.1.2 Tensão individual dos elementos do grupo de baterias

A tensão individual dos elementos, é o parâmetro do algoritmo EDP-IS com o maior peso percentual, cerca de 55%. Este parâmetro é obtido através da consulta dos relatórios MPS medidas, onde a cada elemento do grupo de baterias é realizada uma medição da tensão, após uma descarga a uma taxa de descarga de C/5 durante 30 minutos, ou seja, 10% da capacidade nominal do grupo de baterias.

A partir das medições realizadas, são formados dois conjuntos, o primeiro com elementos que apresentam tensões finais de descarga inferiores a 80% da tensão nominal de referência. O segundo grupo é constituído por elementos que apresentam tensões finais de descarga num intervalo entre 80% e 95% da tensão nominal de referência. Esta tensão difere consoante o tipo, modelo e marca da bateria em questão.

É também necessário associar o número de elementos que se encontra num conjunto, com o número total de elementos constituintes da bateria. Desta forma, obtemos assim a percentagem de elementos de um conjunto em função do número total de elementos da bateria.

A percentagem obtida, percentagem de elementos de um certo conjunto, é dividida em intervalos e a cada intervalo é associado um peso percentual, como está representado na tabela 5.2. Para obter o peso percentual final da tensão, é selecionado o peso mínimo entre os pesos dos conjuntos de elementos. Posteriormente é realizado o produto entre este peso percentual e o peso algorítmico total da tensão (55%), para obter o peso algorítmico final da tensão.

Tabela 5.2: Pesos dos conjuntos de elementos com diferentes intervalos percentuais do parâmetro tensão

Elementos com tensões inferiores a 80%		Elementos com tensões entre [80,95]%	
Intervalos de percentagens	Pesos	Intervalos de percentagens	Pesos
0%	100%	0%	100%
]0;5]%	75%]0;25]%	75%
]5;20]%	50%]25;80]	50%
]20;40]%	25%]80;100]	25%
]40;100]%	0%	-	-

5.2.1.3 Corrosão dos armários e dos grupos de baterias

A corrosão física dos armários e dos grupos de baterias, apresentam ambos um peso algorítmico de 10%. Estes parâmetros são avaliados recorrendo à observação física dos mesmos. De um modo geral, o estado físico destes ativos encontra-se descrito nas notas dos relatórios MPS. No entanto, se for necessário podem ser realizadas através de análises de campo.

A observação está dividida em diferentes estados da condição dos ativos, onde a estes são associados pesos, como está descrito na tabela 5.3. Para obter o peso algorítmico relativo a estes parâmetros, é realizado o produto entre os pesos representados na tabela e o peso algorítmico total das corrosões (10% armários, 10% baterias).

Tabela 5.3: Pesos dos parâmetros corrosão do armário e do grupo de baterias

Corrosão do armário		Corrosão do grupo de baterias	
Estado	Pesos	Estado	Pesos
Sem corrosão	100%	Nenhuma bateria com danos	100%
Com pontos de corrosão	75%	Até 10% das baterias com danos	75%
Até 25% da superfície	50%	Entre 10% a 25% das baterias com danos	50%
Entre 25% e 50% da superfície	25%	Mais do que 25% das baterias com danos	25%
Mais de 50% da superfície	0%	-	-

5.3 Algoritmo EDP-IS-2018

O algoritmo EDP-IS-2018, tem também por base os parâmetros registados nos relatórios de ensaios MPS e MPS Medidas. Deste modo, é esperado que este algoritmo satisfaça os seguintes objetivos:

- Implementação de um algoritmo de estimação de índice de saúde de baterias, funcional para todos os tipos, modelos e marcas de baterias existentes na ORD.
- Integração de um novo parâmetro: condutância ou resistência interna.
- Análise dos parâmetros recorrendo a parâmetros estatísticos (média aritmética e desvio médio)

A ORD também indicou as suas expectativas relativamente aos pressupostos e condicionantes do algoritmo EDP-IS-2018, entre eles:

- O algoritmo desenvolvido tem que apresentar um custo computacional e financeiro baixo.
- Desenvolver o algoritmo com base nos dados já existentes nos relatórios realizados pela ORD.
- Obtenção de um *output* quantitativo que consiga ordenar e classificar os grupos de baterias da ORD.

5.3.1 Parâmetro complementar: resistência interna ou condutância

A integração de um novo parâmetro no algoritmo, completa e torna mais robusta a estimação de índice de saúde de baterias. Este parâmetro é utilizado como indicador do índice de saúde de uma bateria visto que, à medida que a bateria se deteriora a sua resistência interna aumenta. O índice de saúde pode ser determinado, comparando os valores medidos da resistência interna atual (R_{atual}) com os valores de uma bateria nova ($R_{nominal}$) e uma bateria em fim de vida (R_{eol}), como está representado na equação 5.1 [59, 60].

$$SOH = \frac{R_{eol} - R_{atual}}{R_{eol} - R_{nominal}} \% \quad (5.1)$$

A resistência interna é um parâmetro intrínseco a todos os tipos, marcas e modelos de baterias, sendo sempre um parâmetro a ter em conta no processo de avaliação da condição de uma bateria. As possíveis alterações deste parâmetro estão diretamente relacionadas com o desempenho da bateria, bem como a sua capacidade disponível e consequentemente o seu índice de saúde. Deste modo, todos os fatores que influenciem a condição da bateria, estão relacionados com a resistência interna da mesma [22].

Existe também uma incerteza relativa à medição da resistência interna já que, muitas vezes as baterias apresentam comportamentos não-lineares que condicionam e causam erros no processo de medição da resistência interna. Variáveis como a temperatura elevada e capacidades parasitas podem causar erros consideráveis na medição da resistência interna [61].

A resistência interna elevada, traduz-se na dificuldade de uma bateria fornecer energia, deste modo causando o aquecimento da bateria e uma queda da tensão, levando a restrições na corrente e aumentando a probabilidade de falha. O funcionamento normal e esperado de uma bateria acontece quando os valores da resistência interna se encontram baixos. Desta forma, é possível notar que quanto mais degradada uma bateria estiver, maior a sua resistência interna, visto que esta aumenta ao longo da vida de uma bateria e também dependendo da sua utilização [62].

A condutância é o parâmetro inversamente proporcional à resistência interna, refletindo a facilidade do fluxo de corrente elétrica [62].

5.3.2 Parâmetros estatísticos: desvio padrão e média aritmética

Um grupo de baterias é um sistema com várias variáveis interdependentes, sendo que variações no desempenho de células isoladas, causam repercussões em todos os elementos da bateria [63].

O desequilíbrio de um sistema de baterias é caracterizado por diferenças de SOC entre as células do sistema ou capacidade disponível e consequentemente disparidades entre os valores da resistência interna e condutância. Este fenómeno resulta numa diminuição da esperança de vida do grupo de baterias, bem como uma redução da sua capacidade total disponível. De um modo geral, o desequilíbrio entre células de um grupo de baterias é causado por diversos fatores como: influencias ambientais (temperatura), taxas de corrente de descarga não aconselhadas, distúrbios no processo de fabrico das baterias e consecutiva sobretensão de células específicas [63, 64].

Num grupo de baterias onde todas as células estão conectadas em série, todas apresentam a mesma corrente de carga e descarga. Adicionalmente, a tensão de corte do grupo de baterias é determinada pela célula mais "fraca", ou seja, com menor capacidade total disponível, dentro de todas as células conectadas em série. Deste modo, um desequilíbrio numa destas células da bateria pode ter um impacto bastante significativo na capacidade total do sistema e consequentemente na sua esperança de vida [64].

De forma a maximizar a energia que um grupo de baterias pode fornecer, é normalmente instalado um sistema de equalização no grupo de baterias. Deste modo, o excesso de energia nas células com maior capacidade disponível, é fornecido às células com menor capacidade disponível. Sendo assim possível aproveitar toda a energia que o grupo de baterias tem para fornecer [63].

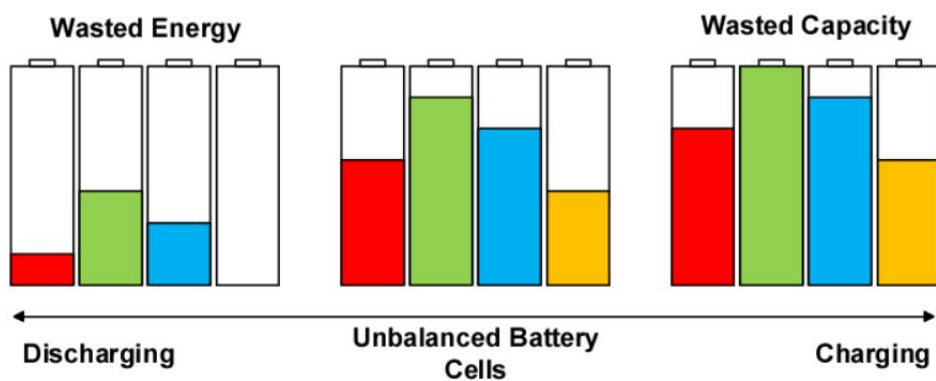


Figura 5.2: Desequilíbrio entre células de um grupo de baterias [16]

Visto que o desequilíbrio de um sistema de baterias é um fator bem descritivo da condição e desempenho de um grupo de baterias, foram incorporados vários parâmetros estatísticas no algoritmo de estimação de índice de saúde, que descrevem este mesmo desequilíbrio do sistema.

Em primeiro lugar, é utilizada a média aritmética como parâmetro estatístico, ou seja, é realizado o cálculo da média aritmética dos parâmetros dos elementos do grupo de baterias, como está representado na equação 5.2. Este parâmetro estatístico consegue avaliar a condição do grupo de baterias relativamente à tensão ou condutância dos seus elementos.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.2)$$

Onde, " x_i " representa o parâmetro em questão de cada elementos do grupo de baterias e " n " representa o número total de elementos existentes no grupo de baterias.

É também incorporado o desvio padrão como parâmetro estatístico, este pretende descrever o equilíbrio do sistema de baterias, já que este é uma medida de dispersão da média de um certo parâmetro. Deste modo, quanto menor o desvio padrão, maior o equilíbrio do sistema de baterias e consequentemente, maior o seu índice de saúde. O cálculo do desvio padrão é realizado como está representado na equação 5.3.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{(n - 1)}} \quad (5.3)$$

Enquanto que a média aritmética se encarrega de avaliar um parâmetro do grupo de baterias relativamente a um valor de referencia, o desvio padrão é responsável por caracterizar o desequilíbrio dos elementos do grupo de baterias.

5.3.3 Descrição do algoritmo EDP-IS-2018

O algoritmo EDP-IS-2018, tal como o algoritmo original EDP-IS, baseia-se em dados recolhidos nos ensaios periódicos que a ORD realiza, sendo estes o MPS e MPS medidas. Ambos estes ensaios avaliam parâmetros fundamentais para a estimação do índice de saúde dos grupos de baterias da ORD.

Relativamente ao modo de classificação do índice de saúde do algoritmo EDP-Is-2018, este é expresso na forma de percentagem com um intervalo entre 0% e 100%. Sendo que quando o índice de saúde de um grupo de baterias é 100%, significa que este grupo demonstra um comportamento semelhante a um grupo de baterias novo. Por outro lado quando um grupo de baterias apresenta um índice de saúde de 0%, significa que o grupo se encontra incapaz de fornecer energia, ou seja, a sua capacidade disponível é zero Ah.

Neste algoritmo são considerados três parâmetros, nomeadamente a tensão final de descarga por elemento, a idade do grupo de baterias e a condutância ou resistência interna por elemento. A estes parâmetros são associados pesos algorítmicos dependendo da sua relevância para a estimação do índice de saúde.

A tabela 5.4 descreve como estão organizados os pesos entre os diferentes parâmetros.

Parâmetros	Pesos
Idade	15%
Tensão	50%
Condutância	35%

Tabela 5.4: Pesos dos parâmetros do algoritmo de estimação do índice de saúde EDP-IS-2018

O parâmetro da idade do grupo de baterias é considerado da mesma forma como em 5.2.1.1

Relativamente aos parâmetros, tensão e condutância, estes são avaliados recorrendo a parâmetros estatísticos como a média aritmética e o desvio padrão. Para que estes traduzam exatamente o que é desejado, é necessário que seja realizada uma análise coerente da relação entre os parâmetros estatísticos e os parâmetros dos elementos dos grupos de baterias (tensão e condutância).

De seguida, vão ser feitas as análises dos parâmetros tensão e condutância, tendo em conta o seu contributo geral para a estimação do índice de saúde de baterias. Posteriormente, vai ser feita uma análise aos parâmetros estatísticos média aritmética e desvio padrão, relacionando-os com um índice de saúde de baterias.

5.3.3.1 Análise do parâmetro de entrada: tensão

A tensão de cada elemento de um grupo de baterias é um parâmetro que é medido no final de um ensaio de descarga realizada semestralmente a estes ativos da ORD. Este parâmetro difere consoante o tipo, marca e modelo das baterias que incorporam os grupos.

Tendo sido realizada uma análise geral deste parâmetro nos ensaios fornecidos pela ORD, foi possível observar que este parâmetro varia muito pouco com a idade e a condição do grupo de baterias. Na maioria dos grupos, a tensão apresenta-se sempre num valor constante e nunca inferior ao valor nominal. Na figura 5.3, é possível observar uma análise realizada à média da tensão de 28 grupos de baterias com diferentes tipos e idades de instalação. Analisando o gráfico verifica-se que a tensão se mantém praticamente constante e com valores superiores aos valores nominais de tensão (1.2 V).

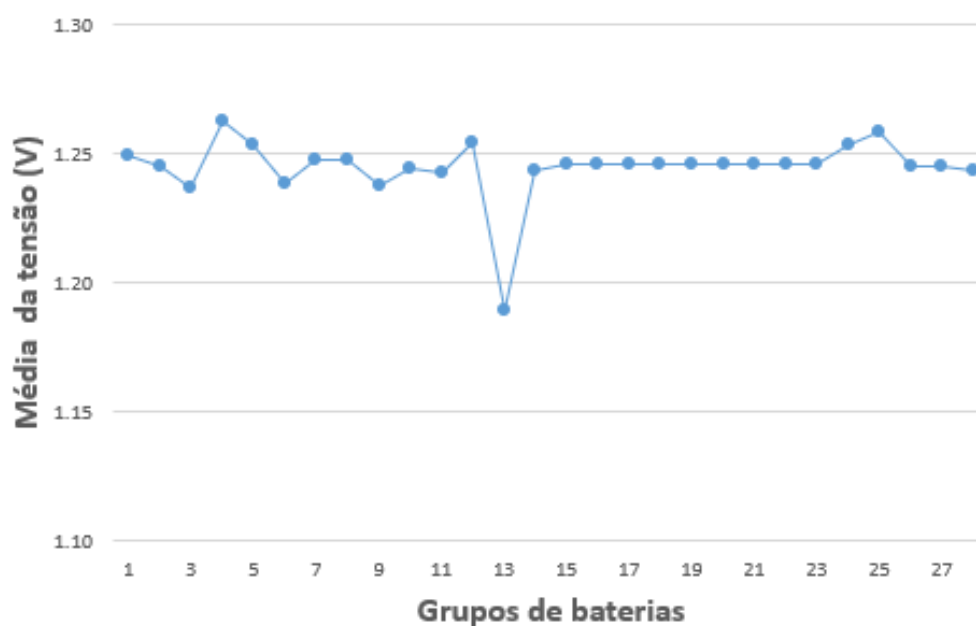


Figura 5.3: Média da tensão de final de descarga dos elementos de diferentes grupos de baterias

Estes valores de tensão só apresentam variações, quando os grupos de baterias já se encontram para lá da sua vida útil e com um elevado desgaste, sendo que em todos os casos, os grupos de baterias apresentaram falhas algum tempo após a realização dos ensaios MPS. É importante referir que uma falha de um grupo de baterias, traduz-se numa diminuição abrupta da sua capacidade nominal disponível quando sujeita a uma carga.

O parâmetro de tensão é utilizado neste algoritmo como um parâmetro preventivo de falhas graves nos grupos de baterias da ORD, sendo que este só apresenta variações quando a condição do grupo de baterias apresenta um desgaste considerável e já não se encontra de acordo com as expetativas da ORD.

5.3.3.2 Análise do parâmetro de entrada: condutância

Relativamente à condutância, foi realizada uma análise a vários grupos de baterias para conseguir perceber o comportamento da condutância com a idade e condição das baterias da ORD.

Desta forma, foi realizada uma análise a 16 ensaios de grupos de baterias do mesmo modelo, sendo que metade (8) apresentavam 1 e 2 anos de idade, enquanto os outros apresentavam 10 e 11 anos de idade. Na figura 5.4 estão representados estes ensaios de baterias com a respetiva média aritmética da condutância dos seus elementos.

Deste modo, é possível observar a existência de uma variação do parâmetro condutância em grupos de baterias com diferentes idades, visto que a série a cor de laranja no gráfico apresenta uma condutância bastante inferior à série representada a azul e consequentemente estará seguramente em pior condição. Desta forma, através deste gráfico é possível concluir com resultados reais que a condutância é um parâmetro que varia com a idade e condição de um grupo de baterias.

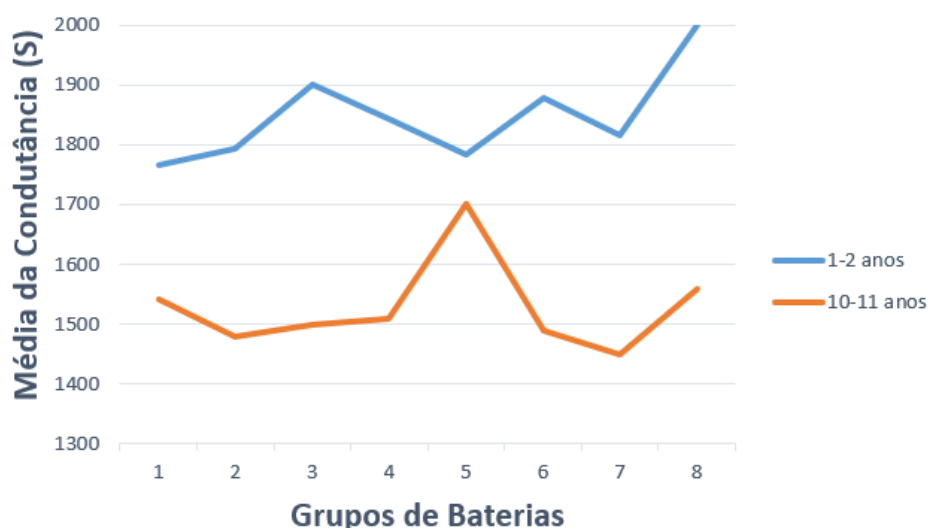


Figura 5.4: Comparação entre a média da condutância de grupos de baterias do mesmo modelo com diferentes idades (1-2 anos e 10-11 anos)

5.3.3.3 Análise do parâmetro estatístico: média aritmética

A média aritmética permite avaliar as medições por elemento da tensão e da condutância de um grupo de baterias. Desta forma é possível obter informação acerca da condição geral do grupo de baterias.

Para construir uma relação concreta entre a média dos parâmetros de entrada (tensão e condutância) e um índice de saúde, foram desenvolvidas duas funções para obter estas relações, onde a média de cada parâmetro em análise se encontra expressa como percentagem dos seus valores de referência, representado na equação 5.4. Sendo que o valor de referência da média de um parâmetro representa a condição ideal relativamente a esse parâmetro e consequentemente traduz-se numa percentagem de índice de saúde de 100%.

$$\mu_{\%ref} = \frac{\mu}{\mu_{ref}} \times 100\% \quad (5.4)$$

Para descrever esta relação, inicialmente foi utilizada uma função linear que se encontra exemplificada na figura 5.5.

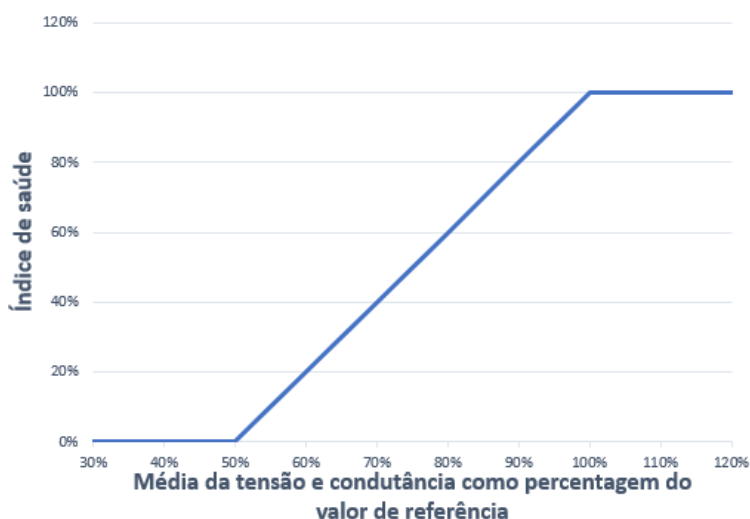


Figura 5.5: Relação linear entre índice de saúde e a média aritmética da tensão e/ou condutância dos elementos de um grupo de baterias, expressa como percentagem do seu valor de referência

Com base em informação dos histórico das baterias da ORD e pela experiência empírica dos gestores dos sistemas de baterias, foi possível inferir que a relação entre estes parâmetros e o índice de saúde não é linear. De um modo geral, os parâmetros demonstram que a partir de um certo intervalo de valores, a sua condição diminuía de forma mais acentuada. Por outro lado, nos intervalos de valores mais próximos do valor de referencia (100%), a condição das baterias encontra-se bastante mais elevada do que é representado por uma função linear.

Após várias análises a diferentes tipos de funções, concluiu-se que a função logarítmica é a função que melhor caracteriza esta relação. Na figura 5.6 é possível observar a diferença entre a função linear e logarítmica, estando estas representadas a azul e vermelho, respetivamente.

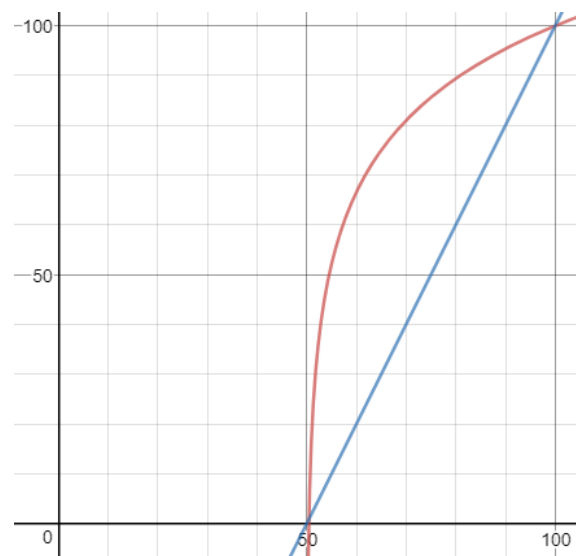


Figura 5.6: Comparação entre uma função linear e logarítmica no contexto do problema

Deste modo, para relacionar a média da tensão e da condutância com um peso de índice de saúde, foram desenvolvidas funções com um comportamento logarítmico. Estas apresentam limites superior e inferior dos parâmetros da média aritmética da tensão e condutância, sendo que o limite superior representa 100% de peso de índice de saúde e o limite inferior representa 0% de peso de índice de saúde. É importante referir que o limite superior, no caso da média aritmética, representa também o valor de referencia de cada parâmetro (100% de índice de saúde).

Análise da média aritmética relativamente à condutância

Na figura 5.7, está representada a relação entre a média aritmética da condutância e o peso percentual de índice de saúde. Esta relação apresenta um limite superior para a média aritmética de 100%, que se caracteriza em 100% de índice de saúde e um limite inferior de 70% que se traduz em 0% de índice de saúde.

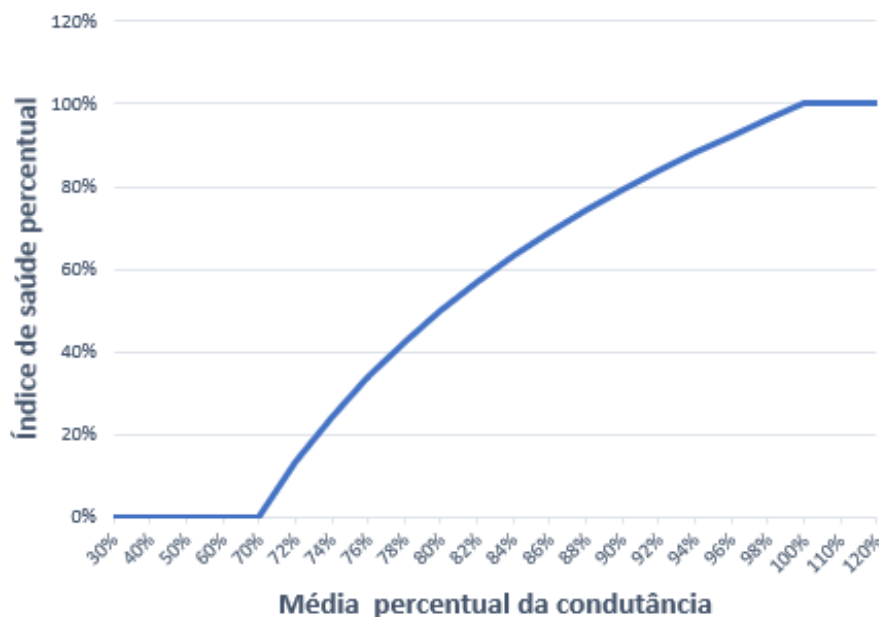


Figura 5.7: Relação entre a média percentual da condutância e o peso de índice de saúde

A função apresenta um comportamento logarítmico entre o limite inferior e superior, sendo estes 70% e 100%, respectivamente. Esta pode ser representada pela respectiva equação 5.5, sendo que " μ " representa a média percentual da condutância e " IS " o respectivo peso de índice de saúde.

$$IS = \left(\left(\frac{-1}{\ln(0.1)} \right) \times \ln \left(\frac{\mu - 60}{100} \right) + 1 \right) \times 166,1 \quad (5.5)$$

O limite superior desta relação, é considerado em função do valor de referência da média condutância. Desta forma, o valor de referência da média condutância representa a condição ideal do grupo de baterias (100% de índice de saúde), sendo que estes valores de referência da condutância e da tensão, variam consoante o tipo, marca e modelo das baterias.

Para obter os valores de referência relativos à média da condutância, foi realizada uma análise a mais de 30 ensaios a grupos de baterias novas (<6 meses). Na figura 5.8, estão representadas as medições da condutância dos elementos de um grupo de baterias do tipo alcalino e a sua respetiva média aritmética.

Realizando várias análises à média da condutância de vários grupos de baterias novos do mesmo modelo, é possível obter um valor de referência para a condutância (100%) desse mesmo modelo de baterias, que indica um índice de saúde de 100%.

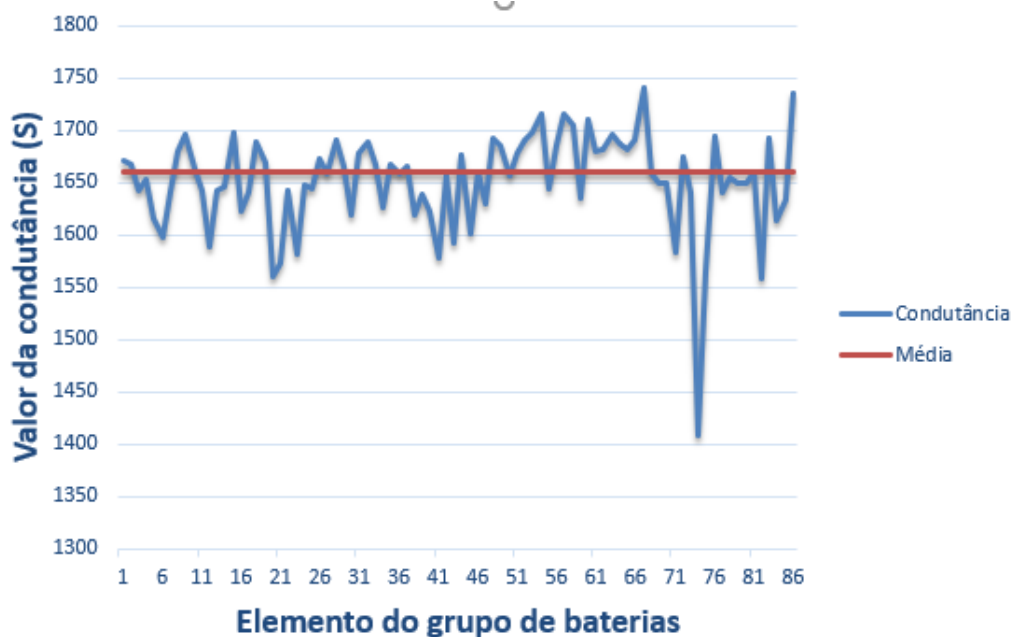


Figura 5.8: Valores de condutância por elemento de um grupo de baterias novo da ORD

Para o limite inferior, foram analisados vários ensaios a grupos de baterias com 11 e 12 anos, sendo que estas apresentavam uma média da condutância por volta dos 87%. Também foi feita uma análise a grupos de baterias com uma idade próxima a 20 anos, sendo que a maior parte destas apresentava uma média da condutância na ordem dos 80%.

Os valores da média da condutância só desciam para valores inferiores a 70%, quando os grupos de baterias já se encontravam para lá da sua vida útil e com um elevado desgaste, sendo que em todos os casos, os grupos de baterias apresentaram falhas algum tempo após a realização dos ensaios MPS.

Assim, pela experiência empírica dos gestores de sistemas de baterias e também pela análise realizada aos ensaios de certos grupos de baterias, foi possível inferir que o limite inferior da média aritmética da condutância é 70%, como é possível observar na figura 5.7

Análise da média aritmética relativamente à tensão

Na figura 5.9, está representada a relação entre a média da tensão e o respetivo peso de índice de saúde. Esta função também apresenta um comportamento logarítmico entre os limites superior e inferior, sendo estes 100% e 90%, respetivamente.

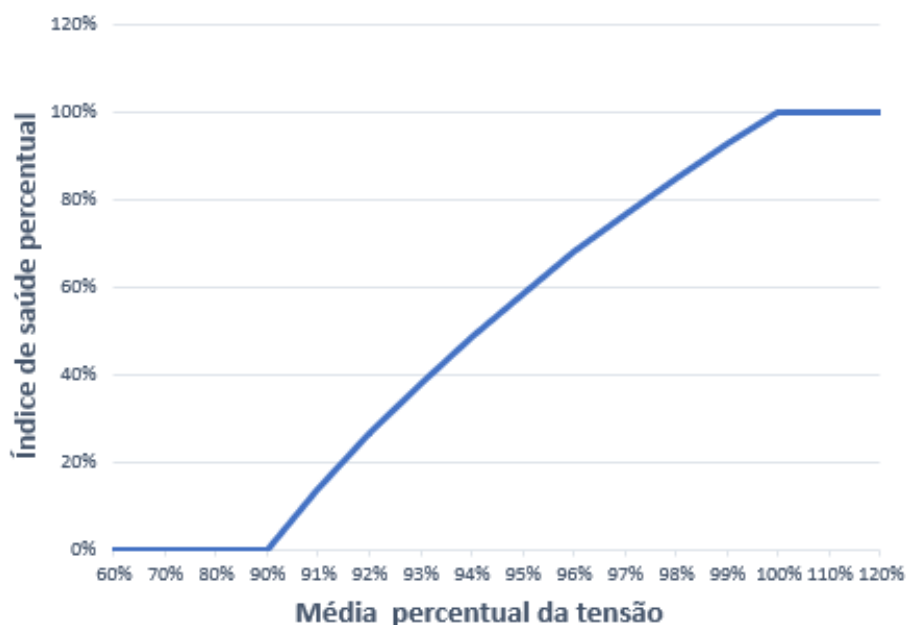


Figura 5.9: Relação entre a média percentual da tensão e o peso de índice de saúde

Esta função pode ser representada pela equação 5.6, onde " μ " representa a média percentual da tensão e " IS " o peso de índice de saúde.

$$IS = \left(\left(\frac{-1}{\ln(0.1)} \right) \times \ln \left(\frac{\mu - 80}{100} \right) + 1 \right) \times 332,2 \quad (5.6)$$

O limite superior, e neste caso, também o valor de referência da média da tensão, é conseguido tal como na média da condutância. Desta forma, é realizada uma análise de vários ensaios a grupos de baterias novos, onde posteriormente é realizada a média aritmética de todos os grupos de baterias do mesmo modelo para obter o valor de referência de cada modelo de baterias. Na figura 5.10 está representada a tensão dos elementos de um grupo de baterias e a sua respetiva média aritmética como exemplo da metodologia utilizada.

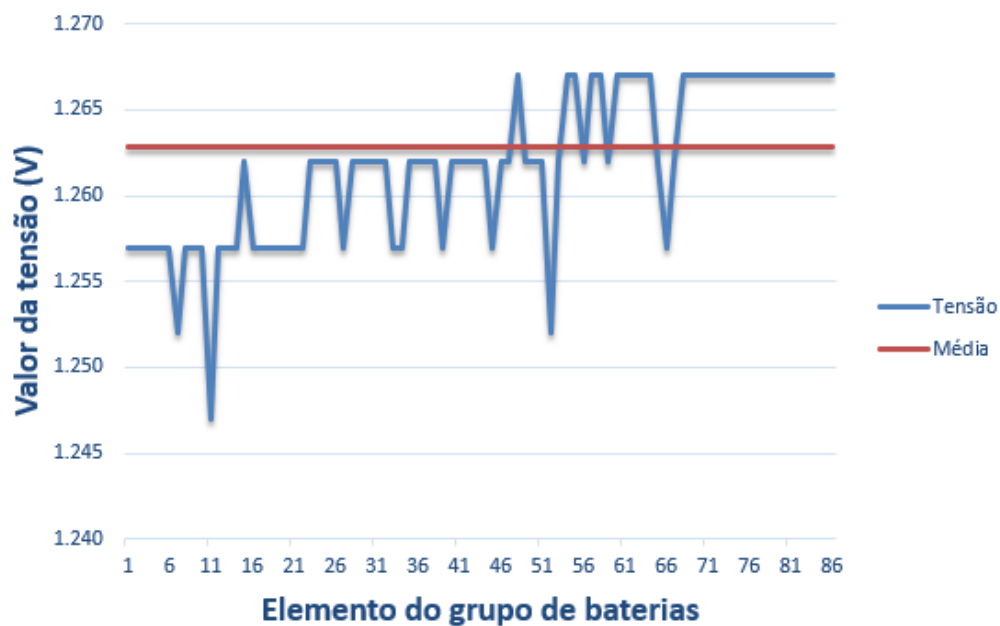


Figura 5.10: Valores de tensão por elemento de um grupo de baterias novo da ORD

A relação apresentada em 5.9 apresenta um limite inferior elevado (90%), visto que após a análise de vários ensaios a grupos de baterias, somente os grupos de baterias que apresentavam uma idade para lá da sua vida útil e um historial de falha é que apresentavam uma média percentual de tensão inferior a 90% nos seus ensaios anteriores à falha.

Com exceção aos grupos de baterias que apresentavam falhas pouco tempo após os ensaios MPS, todos os grupos de baterias da ORD apresentam valores médios de tensão próximos ou superiores aos seus valores de referência (100%). Desta forma, o parâmetro de tensão é utilizado para prevenção de possíveis falhas funcionais dos grupos baterias.

5.3.3.4 Análise do desvio padrão

O desvio padrão permite avaliar o equilíbrio de um grupo de baterias, relativamente à tensão e condutância dos seus elementos. Como já foi referido anteriormente, o desequilíbrio entre elementos de um grupo de baterias tem um grande impacto na esperança de vida do mesmo, resultando muitas vezes numa diminuição da capacidade disponível do sistema.

Visto que o desvio padrão depende do valor da média aritmética e as baterias em análise apresentam valores de tensão e condutância por vezes bastante diversos, o desvio padrão é sempre considerado como percentagem da média aritmética. A equação 5.7, apresenta como é obtido o desvio padrão em percentagem da média.

$$\sigma_{\% \mu} = 100 - \frac{\sigma \times 100}{\mu} \quad (5.7)$$

É importante realçar que as relações estabelecidas entre o desvio padrão percentual da tensão e da condutância com o índice de saúde, apresentam o mesmo raciocínio utilizado para a média aritmética. Desta forma, estas relações apresentam um comportamento logarítmico como pode ser observado nas figuras 5.11, 5.14

Análise do desvio padrão relativamente à condutância

Na figura 5.11, está representada a relação entre o desvio padrão percentual da condutância e o peso percentual de índice de saúde. Esta relação encontra um limite superior para o desvio padrão de 95%, que se caracteriza em 100% de índice de saúde e um limite inferior para o desvio padrão de 80% que se traduz em 0% de índice de saúde.

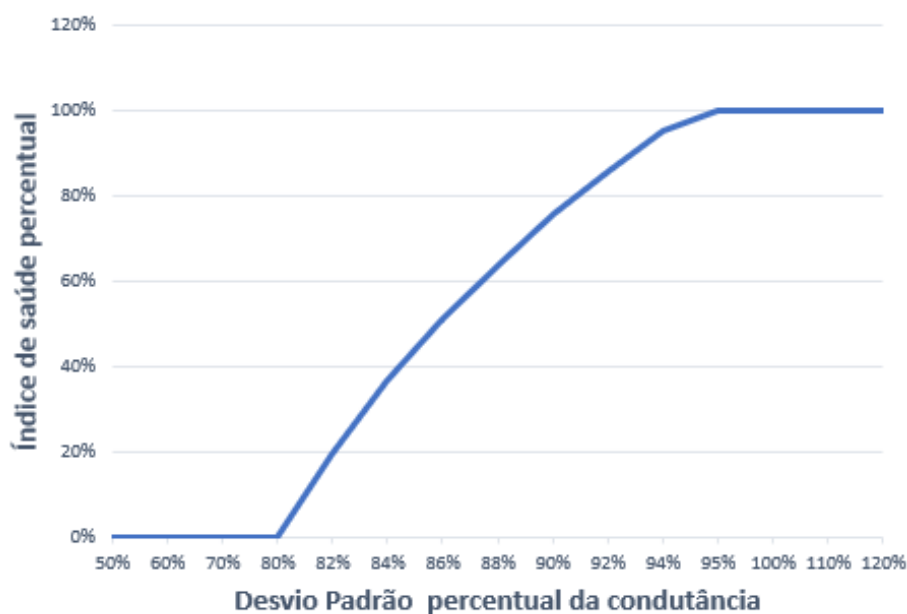


Figura 5.11: Relação entre desvio padrão percentual da condutância entre vários grupos de baterias do tipo 1

A função apresenta um comportamento logarítmico entre o limite inferior e superior, sendo estes 80% e 95%, respetivamente. Esta função pode ser representada pela respetiva equação 5.8, sendo que " μ " representa a média percentual da condutância e " IS " o peso de índice de saúde.

$$IS = \left(\left(\frac{-1}{\ln(0.1)} \right) \times \ln \left(\frac{\mu - 70}{100} \right) + 1 \right) \times 251,3 \quad (5.8)$$

O limite superior para o desvio padrão percentual da condutância foi conseguido utilizando a mesma metodologia que foi empregue para a média aritmética. Desta forma, foram analisados vários ensaios a grupos de baterias novas (< 6 meses) e posteriormente realizada uma média aritmética de todos os ensaios para obter o valor do limite superior para o desvio padrão percentual.

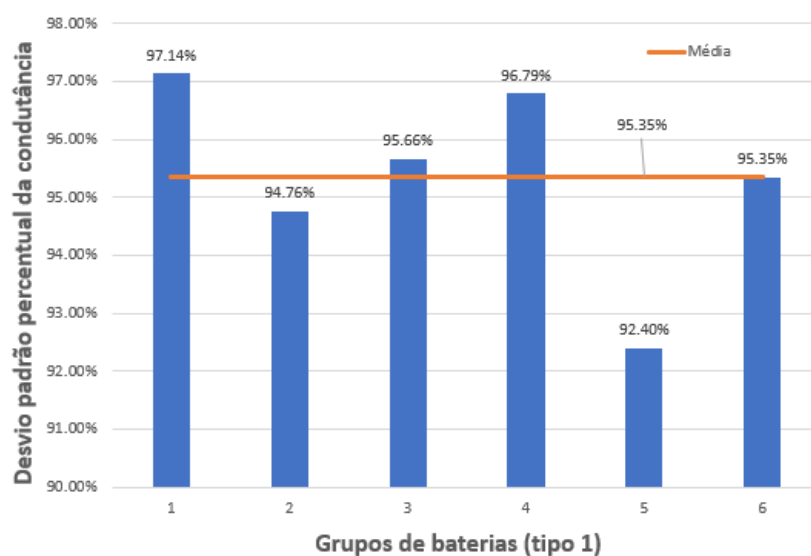


Figura 5.12: Relação entre desvio padrão percentual da condutância entre vários grupos de baterias do tipo 1

Nas figuras 5.12 e 5.13 está representado o desvio padrão percentual da condutância dos elementos de grupos de baterias do mesmo modelo e sensivelmente com a mesma idade (inferior a 6 meses), sendo que a figura 5.12 apresenta baterias do tipo 1 e a figura 5.13 apresenta baterias do tipo 2.

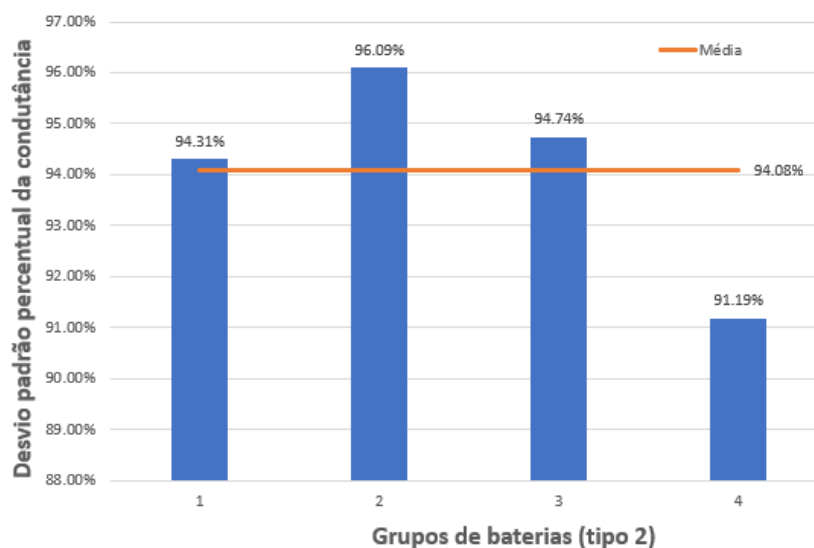


Figura 5.13: Relação entre desvio padrão percentual da condutância entre vários grupos de baterias do tipo 2

Desta forma foi possível inferir que o limite superior para o desvio padrão percentual da condutância é 95%, portanto para este valor do desvio padrão percentual, o peso do índice de saúde

será de 100%, como é possível observar na figura 5.11.

Relativamente ao limite inferior, foi feita uma análise de vários ensaios a grupos de baterias que apresentavam uma idade avançada ou um desgaste evidente. Assim, foi possível observar que grande parte dos grupos com uma idade avançada (>20 anos no caso de alcalinas e >10 anos no caso de chumbo-ácido) ou um desgaste evidente, apresentavam valores de desvio padrão percentual da condutância próximos de 90%.

Somente em casos, onde os grupos de baterias apresentavam falhas funcionais algum tempo após o ensaio MPS, é que o desvio padrão percentual da condutância descia para valores inferiores a 80%. Desta forma, devido à análise realizada a ensaios de grupos de baterias e pela experiência empírica dos gestores de sistemas de baterias, foi possível inferir que o limite inferior do desvio padrão percentual da condutância é 80%, como é possível observar na figura 5.11..

Análise do desvio padrão relativamente à tensão

Na figura 5.14, está representada a relação entre o desvio padrão percentual da tensão e o peso percentual de índice de saúde. Esta relação encontra um limite superior para o desvio padrão de 99,5%, que se caracteriza em 100% de índice de saúde e um limite inferior para o desvio padrão de 90% que se traduz em 0% de índice de saúde.



Figura 5.14: Relação entre desvio padrão percentual da tensão entre diferentes grupos de baterias

Na figura 5.7, está representada a relação entre a média da condutância e o respetivo peso de índice de saúde. A função tem um comportamento logarítmico entre o limite inferior e superior,

sendo estes 90% e 99,5%, respetivamente. Esta função pode ser representada pela respetiva equação 5.9, sendo que " μ " representa a média percentual da condutância e "IS" o peso de índice de saúde.

$$IS = \left(\left(\frac{-1}{\ln(0.1)} \right) \times \ln \left(\frac{\mu - 80}{100} \right) + 1 \right) \times 344,8 \quad (5.9)$$

O limite superior para o desvio padrão percentual da condutância foi conseguido utilizando a mesma metodologia que foi empregue para a média aritmética. Deste modo, na figura 5.15 está apresentada uma análise a 36 grupos de baterias com diversas idades, de forma a encontrar o limite superior. É de realçar que foram utilizadas baterias de todo o espectro de idades pois, como foi referido anteriormente, a tensão de descarga é um parâmetro que varia muito pouco com a idade da bateria.

O desvio padrão percentual da tensão é principalmente utilizado para a sinalização de dispersões que possam causar uma possível falha.

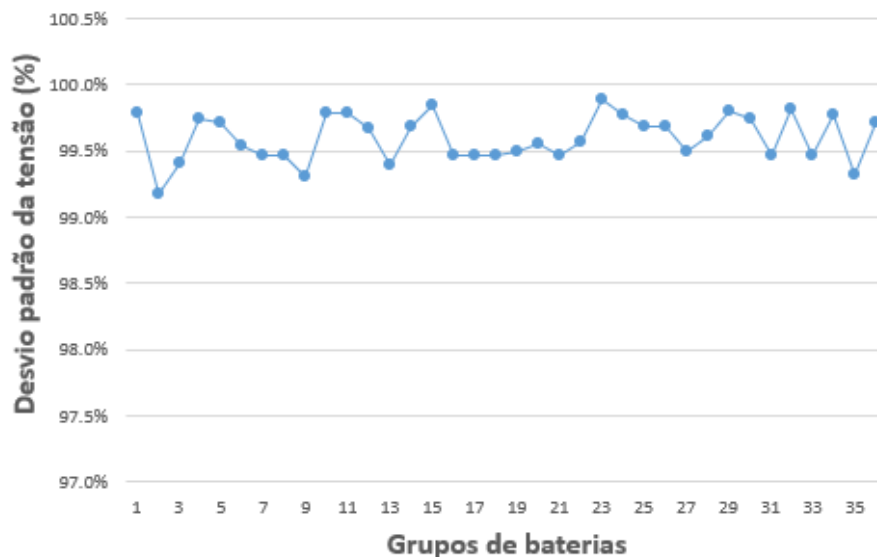


Figura 5.15: Relação entre desvio padrão percentual da tensão entre vários grupos de baterias com idades diversas

Desta forma, como é possível observar na figura 5.15, a média do desvio padrão percentual da tensão dos grupos de baterias apresentados é aproximadamente 99,5%, logo é possível inferir que o limite superior deste parâmetro é 99,5%.

De um modo geral, analisando vários ensaios realizados a diferentes grupos de baterias ,o desvio padrão percentual da tensão só apresenta uma alteração significativa em grupos de baterias que apresentaram uma falha algum tempo após a realização dos ensaios. Nestes casos os valores do desvio padrão percentual da tensão apresentavam valores bastante baixos, inferiores a 85%.

Deste modo, considerando a análise realizada a estes ensaios, histórico de falhas e pela experiência empírica dos gestores dos sistemas de baterias, é possível inferir que o limite inferior do

desvio padrão percentual da tensão é de 90%, como está representado na figura 5.14.

5.3.3.5 Fluxograma

Foi desenvolvido um fluxograma descritivo do algoritmo EDP-IS-2018, apresentado na figura 5.16. Partindo do princípio que o algoritmo tem o objetivo de estimar o índice de saúde de um grupo de baterias, as entradas deste são a tensão e condutância de todos os elementos do grupo de baterias e também a idade do sistema.

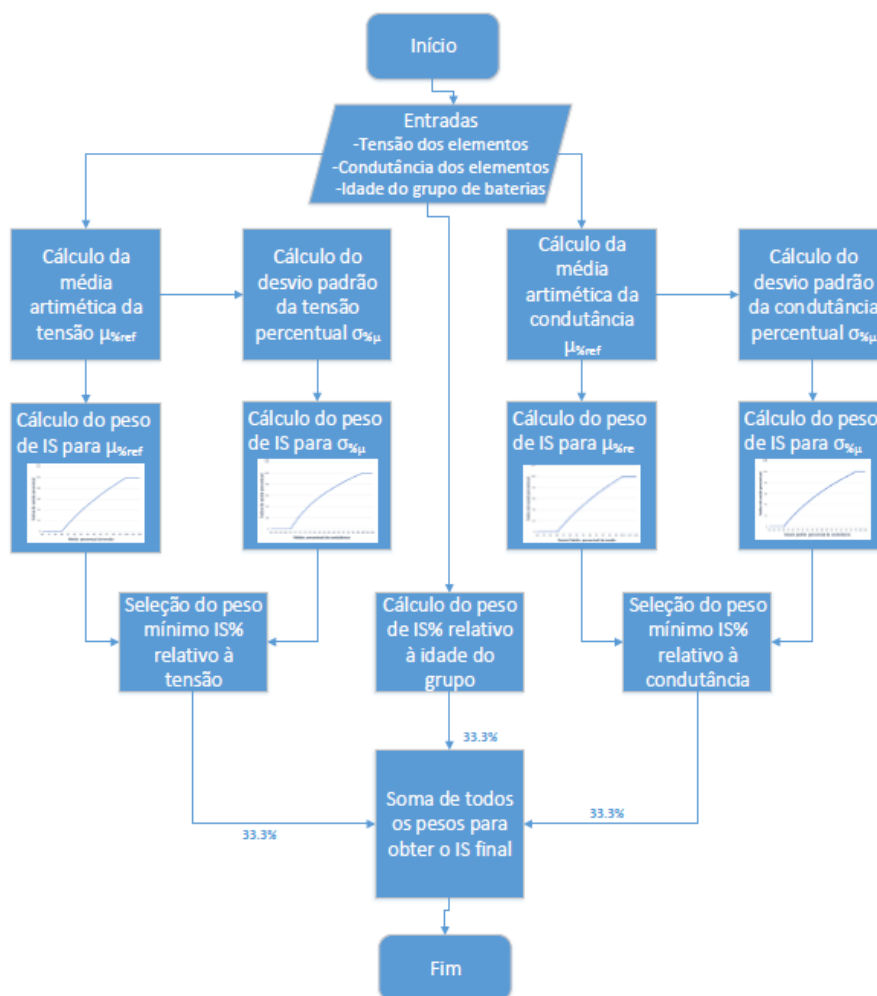


Figura 5.16: Fluxograma do algoritmo EDP-IS_2018

5.4 Conclusões

O algoritmo atualmente utilizado para a gestão dos grupos de baterias, denominado EDP-IS, é utilizado para avaliar a condição dos diferentes grupos de baterias da ORD, estimando o índice de saúde de cada um. De um modo geral, o algoritmo consegue identificar e prevenir com sucesso possíveis falhas nestes sistemas.

Este algoritmo não apresenta nenhum parâmetro que caracterize o índice de saúde dos grupos de baterias ao longo da sua vida, existem apenas parâmetros para a prevenção e sinalização de falhas funcionais (tensão e estado físico). De um modo geral, o índice de saúde estimado por este algoritmo varia principalmente com o parâmetro de idade do sistema, sendo que a tensão e estado físico do sistema, apenas variam quando o grupo de baterias se encontra em risco de falha.

O algoritmo EDP-IS-2018 foi desenvolvido com o objetivo de proposta de melhoria do algoritmo EDP-IS. Relativamente às entradas deste novo algoritmo, foi adicionado o parâmetro da condutância de cada elemento, sendo que com este parâmetro é possível caracterizar o índice de saúde dos grupos de baterias de uma forma mais precisa e obter um panorama de desgaste mais progressivo.

O parâmetro do estado físico do sistema não foi considerado no algoritmo EDP-IS-2018 pois, o sistema só apresenta danos físicos visuais quando este já se encontra em final de vida. Deste modo, a tensão já é um parâmetro suficiente para avaliar a condição de um grupo de baterias em final de vida.

Por fim, algoritmo desenvolvido permite estimar o índice de saúde de todos os grupos de baterias da ORD e consequentemente, ordenar e classificar todos estes sistemas de forma a facilitar a gestão destes ativos, nomeadamente o planeamento da sua manutenção e substituição. O processo de substituição destes ativos, está sempre dependente do nível do risco em que a Subestação que incorpora o grupo de baterias está sujeita, bem como orçamento que a ORD disponibiliza.

Capítulo 6

Validação e implementação do algoritmo EDP-IS-2018

6.1 Introdução

Neste capítulo vai ser apresentada a implementação do algoritmo associado à proposta de melhoria, será também descrita a plataforma onde o algoritmo foi implementado e validado.

Na implementação do algoritmo foram surgindo alguns problemas, que levaram à alteração de certas partes do algoritmo, estes problemas e respetivas soluções adotadas vão ser relatados neste capítulo.

A implementação e validação do algoritmo é realizada através de testes, sendo utilizado o novo algoritmo e o algoritmo atual da ORD, EDP-IS-2018 e EDP-IS, respetivamente.

No final deste capítulo serão descritas possíveis melhorias que poderiam ser aplicadas ao algoritmo.

6.2 Plataforma utilizada para validação e implementação do algoritmo

A implementação do algoritmo EDP-IS-2018, foi conseguido através de uma plataforma já existente na ORD, denominada CardioBat. Esta plataforma foi desenvolvida com o objetivo de tornar o processo de gestão dos grupos de baterias da ORD mais automatizado e simples. Desta forma, foram realizadas várias alterações à plataforma, de modo a implementar o novo algoritmo.

Como foi dito anteriormente, as medições dos ensaios MPS e MPS medidas, utilizados para a estimação do índice de saúde, são guardadas em ficheiros *Excel*. Desta forma, esta plataforma permite importar os dados dos ficheiros *Excel*, para posteriormente estimar o índice de saúde dos grupo de baterias.

O *software* apresenta uma secção denominada "Configurações". Nesta secção é possível definir as características de cada grupo de bateria, como: o tipo de bateria, a idade do sistema, o número de elementos e a mais relevante, os valores de referência da tensão e condutância.

Dados de Referência Diretório: C:\Users\vasco\Documents\5\TRabaho_Tese\DadosRef_Norte.xlsx Carregar Dados ?

Procurar:

	Subestação	(Subst)Parte	(Bat)Marca	(Bat)Modelo	(Bat)Tipo	(Bat)Ano	(Bat)Elementos	(Bat)Tensão Ref	(Bat)Resistência Ref	Corrosão Bateria
▶	Abogalheira	48V	MARATHON	L2V270	AGM	2014	24	2	1754	Nenhuma bateria...
	Acaí	110V	SAFT	KM161P	Alcalina	2003	84	1.2	1754	Nenhuma bateria...
	AGRAS do NOR...	48V	MARATHON	M12V105F	AGM	2008	4	12	1754	Nenhuma bateria...
	Agueda	110V	GAZ	KL200P	Alcalina	2015	84	1.2	1754	Nenhuma bateria...
	Alagoa	110V	SAFT	SCL221	Alcalina	2012	86	1.2	1754	Nenhuma bateria...
	Albergaria	110V	PROTECT LINE	KPL210P	Alcalina	2015	86	1.2	1754	Nenhuma bateria...
	Alfena	110V	SAFT	SCL221	Alcalina	2012	86	1.2	1650	Nenhuma bateria...
	Alvelos	110V	SAFT	SCL221	Alcalina	2012	90	1.2	1650	Nenhuma bateria...
	Alvelos	48V	TUDOR EMISA	VN119-2	Alcalina	1991	40	1.2	1754	Nenhuma bateria...
	Amarante	110V	SAFT	SNL205	Alcalina	2016	86	1.2	1754	Nenhuma bateria...
	Amarante	48V	YUASA	SWL1100	AGM	2016	4	12	1754	Nenhuma bateria...
	Amares	110V	TUDOR EMISA	LP135	Alcalina	2000	90	1.2	1754	Nenhuma bateria...
	Amieira	110V	SAFT	SNL205	Alcalina	2016	86	1.2	1754	Nenhuma bateria...
	Amorosa	48V	TUDOR	LP46	Alcalina	1990	37	1.2	1754	Nenhuma bateria...
	ancora	110V	SAFT	SCL221	Alcalina	2014	86	1.2	1754	Nenhuma bateria...
	Antas	110V	TUDOR EMISA	LP300	Alcalina	1990	86	1.2	1754	Nenhuma bateria...
	Arada	110V	SAFT	KMR4P+1 P80	Alcalina	2002	1.2	1.2	1754	Nenhuma bateria...

Figura 6.1: Partição dos dados de referência (CardioBat)

Esta secção também conta com uma partição onde são definidos todos os pesos algorítmicos bem como os limites superiores e inferiores dos parâmetros utilizados em função do índice de saúde. No entanto, o *software* considera estas relações entre os parâmetros e o índice de saúde lineares. O novo algoritmo a implementar apresenta relações logarítmicas logo, foi necessário proceder à alteração desta parte do *software*.

Estado de Saúde de Baterias Configurações - Percentagens		Algoritmo Adapt. ISB Vcc		Algoritmo Adapt. ISB Resistência		Algoritmo Adapt. ISB Condutância	
Algoritmo EDP-ISB		Média Aritmética		Média Aritmética		Média Aritmética	
Peso (%) Idade Baterias	25	Limite Superior (%) (Peso VDCmáx.)	100	Limite Superior (%) (Peso RESmín.)	150	Limite Superior (%) (Peso COND. máx.)	100
Peso (%) Tensão ou Resistência	55	Limite Inferior (%) (Peso VDCmín.)	80	Limite Inferior (%) (Peso RESmáx.)	100	Limite Inferior (%) (Peso COND. mín.)	50
Desvio Padrão		Desvio Padrão		Desvio Padrão		Desvio Padrão	
Peso (%) Corrosão Baterias	10	Limite Superior (%) (Peso Vcc máx.)	99.5	Limite Superior (%) (Peso RES. máx.)	99.5	Limite Superior (%) (Peso COND. máx.)	99.5
Peso (%) Corrosão Armário	10	Limite Inferior (%) (Peso Vcc mín.)	90	Limite Inferior (%) (Peso RES. mín.)	90	Limite Inferior (%) (Peso COND. mín.)	90

Figura 6.2: Partição das configurações dos algoritmos (CardioBat)

Ainda dentro da secção das Configurações, é possível configurar o processo de importação dos ensaios MPS, sendo que estes apresentam tipologias diferentes.

O *software* apresenta outra secção, sendo esta responsável pela organização dos ensaios dos diferentes grupos de baterias, denominada "Relatórios MPS", onde é possível comparar as características dos mesmos, incluindo o índice de saúde.

A secção "MPS Medidas" apresenta uma forma rápida de leitura do relatório MPS medidas, estimando assim o índice de saúde de um grupo de baterias. Deste modo, é disponibilizada uma *interface* gráfica onde é possível visualizar todos os dados referentes ao grupo de baterias em questão, como: tipologia de baterias, idade do grupo de baterias, corrosão física dos elementos, parâmetros estatísticos (média e desvio padrão), parâmetros da bateria (tensão e condutância) e o índice de saúde final do grupo.

Subestação: Devesa velha [110V] Nr.º Elementos do Grupo: 86
Grupo de Baterias: SAFT SCL221 [Alcalina] Ano de Instalação do Grupo: 2017

Estimação do Estado de Saúde - Algoritmo EDP-ISB

Tipologias de Bate Corrosão Armá
Idade do Grupo de Baterias: 0 anos Corrosão Bater
Tensão de Referência EDPD-ISB [Vcc]: **98.7%**
Nrº de Elem.]80,95]%Vref: 0 (100%) EDPD-IS: **98.7%**
Nrº de Elem. [0,80]%Vref: 0 (100%) EDPD-IS-2018: **98.18%**
Condutância de Referência

Tensão (Vcc) Estatística			
Média Aritmética	Média (%Vref)		
1.2490V	104.0804%		
Desvio Padrão	Desvio Padrão %		
0.00268V	99.7852%		
Peso Média	50%		
Peso Desvio	50%		
Intervalo	1.2463V	37	Elementos fora de limites
[-1σ + 1σ]	1.2516V		
Intervalo	1.2436V	0	
[-2σ + 2σ]	1.2543V	0	
Intervalo	1.2409V	0	
[-3σ + 3σ]	1.2570V		

Condutância Estatística			
Média Aritmética	Média (%Rref)		
1651.4535	97.7191%		
Desvio Padrão	Desvio Padrão %		
47.18466	97.9867%		
Peso Média	33.52%		
Peso Desvio	35%		
Intervalo	1604.268	12	Elementos fora de limites
[-1σ + 1σ]	1698.638		
Intervalo	1557.084	1	
[-2σ + 2σ]	1745.822	1	
Intervalo	1509.899	1	
[-3σ + 3σ]	1793.007		

Figura 6.3: Relatório individual do ensaio MPS medidas

Esta secção é a secção bastante útil para este trabalho de dissertação, visto ser possível analisar detalhadamente todos os parâmetros do algoritmo bem como o valor final de índice de saúde do grupo de baterias.

Foi necessário realizar várias alterações ao *software* para que o novo algoritmo desenvolvido fosse implementado com sucesso. A plataforma foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação C Sharp (C#) no *framework* .NET, deste modo todas as alterações foram feitas nesta linguagem.

6.3 Validação do algoritmo EDP-IS-2018

O algoritmo EDP-IS-2018 tem como objetivo a estimação de um índice de saúde para todos os grupos de baterias da ORD, melhorando assim o processo de manutenção e substituição destes ativos. Após a implementação com sucesso deste algoritmo no *software* CardioBat, foi necessário proceder à validação do mesmo.

6.3.1 Análise geral de ensaios a diferentes grupos de baterias da ORD

Para validação final do algoritmo desenvolvido, foi realizada uma análise aos resultados de vários ensaios de estimação do índice de saúde, apresentados na tabela 6.1. Foram utilizados 6 grupos de baterias com diferentes tipos e idades, sendo calculados os seus respetivos índices de saúde. É de realçar que foi utilizada a plataforma Cardiobat para realizar as várias análises

Teste nº	1	2	3	4	5	6
Tipo de bateria	Alcalinas	Alcalinas	Gel	Gel	AGM	AGM
Ano de instalação	2015	2007	2015	2015	2015	2014
Tensão						
Média percentual	103.75%	103.84%	101.00%	105.32%	103.51%	105.94%
Desvio padrão percentual	99.41%	99.57%	99.47%	99.77%	99.32%	98.67%
Condutância						
Média percentual	98.14%	85.17%	99.15%	94.29%	95.31%	83.52%
Desvio padrão percentual	98.35%	89.07%	97.41%	97.86%	95.16%	73.30%
Índice de saúde final	97.35%	79.37%	96.06%	92.85%	92.88%	57.13%

Tabela 6.1: Análise geral da estimação do índice de saúde de diferentes grupos de baterias

Na validação do teste 1, verificou-se uma homogeneidade de valores elevados de média e desvio padrão percentual dos parâmetros, resultando num índice de saúde também elevado. Este grupo de baterias apresenta um índice de saúde normal para a sua idade, visto que este grupo é datado do ano de 2015.

Na validação do teste 2, verificou-se que os parâmetros estatísticos da condutância apresentam-se bastante inferiores que nos restantes testes. Desta forma o índice de saúde do teste 1 também é inferior aos restantes testes.

Na validação dos testes 3 e 4, os grupos de baterias apresentam o mesmo ano de instalação e tipo de bateria, no entanto o índice de saúde final dos dois demonstra uma diferença de 3%. Analisando a média e o desvio padrão da condutância de ambos os grupos de baterias, é possível observar que o grupo do teste 4, apresenta tanto uma média como um desvio padrão ligeiramente inferiores que o grupo do teste 3, consequentemente também apresenta um índice de saúde inferior.

Relativamente à validação do teste 5, este grupo apresenta baterias de chumbo-ácido AGM, sendo que o seu índice de saúde é satisfatório considerando o seu ano de instalação.

Por fim, na validação do teste 6, é possível verificar que o grupo de baterias apresenta um índice de saúde muito inferior ao expectável, comparando com o seu ano de instalação e com os restantes testes realizados. Desta forma, verificou-se a ocorrência de um erro na medição da condutância de um elemento, sendo que este erro influenciou a estimação do índice de saúde final. Neste tipo de situações, é necessário que o gestor de manutenção de baterias sinalize manualmente estes erros.

6.3.2 Análise de sinalizações

Em primeiro lugar, foi escolhido um modelo de baterias específico para a realização de vários testes. Foram considerados 32 grupos de baterias deste modelo, com um intervalo de idades de 1 a 12 anos. De seguida, foram estimados os índices de saúde dos grupos de baterias de cada ano, utilizando o algoritmo EDP-IS e o EDP-IS-2018

Posteriormente, foi realizada a média dos índices de saúde dos grupos de baterias de cada ano e construído um gráfico relacionando o índice de saúde com a idade dos grupos de baterias, estimado pelo algoritmo EDP-IS e pelo algoritmo EDP-IS-2018, estando estes representados a azul e a cor de laranja na figura 6.4, respetivamente. É importante realçar que todos os ensaios utilizados para estimar o índice de saúde foram realizados no ano de 2017.

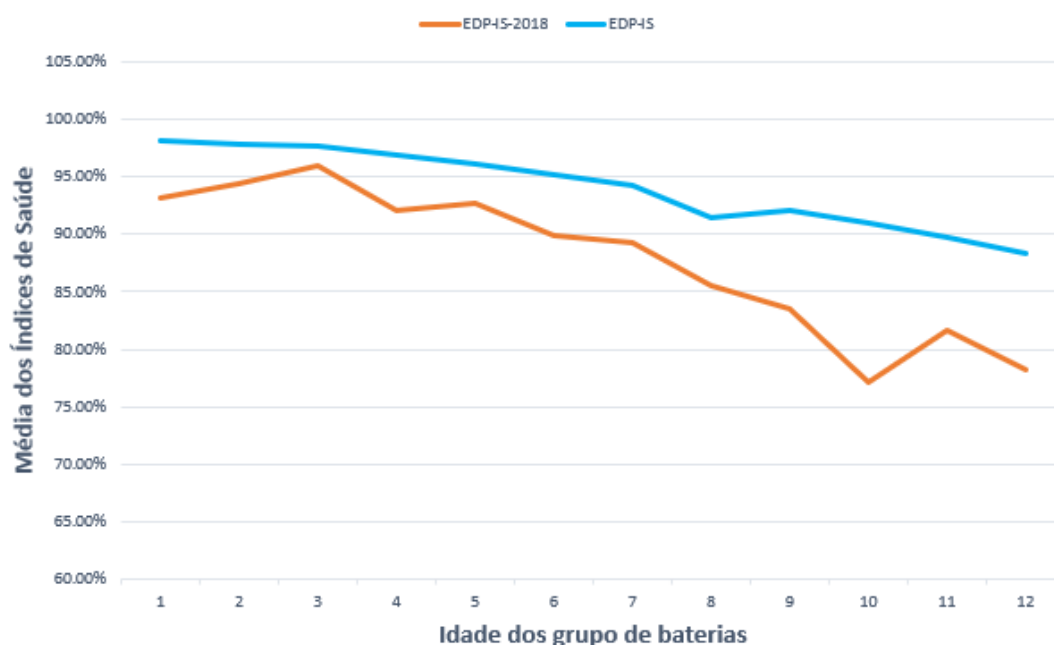


Figura 6.4: Relação entre a média dos índices de saúde de um modelo específico de baterias da ORD com a idade dos grupo de baterias

A partir do gráfico apresentado, considerando o algoritmo EDP-IS-2018, é possível observar uma maior variação do índice de saúde consoante a idade dos grupos de baterias, em parte devido

à incorporação do parâmetro da condutância e dos parâmetros estatísticos (desvio padrão e média aritmética) no algoritmo.

Observando o índice de saúde dos grupos de baterias com 10 anos de idade e os com 11 anos de idade, é possível averiguar que os primeiros apresentam um índice de saúde mais baixo do que os últimos, mesmo estes apresentando uma idade inferior.

Esta sinalização pode relacionar-se com vários fatores como: a temperatura, humidade, número de ciclos realizados, profundidade das descargas (DOD) 3.4.2 e frequência de manutenção a que os grupos de baterias foram sujeitos. Para perceber melhor qual a relação entre estas sinalizações e os parâmetros utilizados no algoritmo EDP-IS-2018, foi realizada uma análise a dois grupos de baterias um com 10 e outro com 11 anos de idade.

A análise foi realizada recorrendo à plataforma Cardiobat, utilizando a funcionalidade de relatório individual como em 6.3, já que é possível avaliar os parâmetros de tensão e condutância, bem como os seus parâmetros estatísticos de forma mais rápida e detalhada. Os relatórios individuais dos grupos de baterias A e B, encontram-se apresentados no Anexo B.

O parâmetro de tensão nestes dois grupos de baterias, apresentava valores de média aritmética e desvio padrão, que resultaram num índice de saúde de 100%. Desta forma, despistando qualquer possibilidade de ocorrência de uma falha funcional nos grupos de baterias.

Por outro lado, o novo parâmetro incorporado no EDP-IS-2018, a condutância, apresenta uma variação mais acentuada ao longo da vida de uma bateria, logo este será o parâmetro com mais importância para esta análise. Na tabela 6.2, estão apresentados os valores da média aritmética e desvio padrão da condutância dos dois grupos de baterias em análise, bem como o seu índice de saúde final utilizando o novo algoritmo desenvolvido.

Grupos de baterias	A	B
Idade do grupo de baterias	10 anos	11 anos
Valor de Referência da condutância	1810 (S)	1810 (S)
Média da condutância	1449 (S)	1702 (S)
Média percentual da condutância	80.05%	94.00%
Desvio padrão percentual da condutância	87.36%	91.42%
Índice de saúde final	77.15%	87.74%

Tabela 6.2: Análise dos parâmetros de dois grupos de baterias do mesmo modelo com idades distintas

Após a análise da tabela 6.2, é possível observar que o grupo de baterias A com 10 anos de idade apresenta um índice de saúde bastante inferior que o grupo B com 11 anos de idade. Esta variação de índice de saúde deve-se em parte, à grande diferença entre a média da condutância dos dois grupos, sendo que existe uma variação de aproximadamente 11% relativamente ao valor de referência dos dois grupos de baterias. Por outro lado, o desvio padrão percentual da condutância que caracteriza o desequilíbrio dos elementos do grupo de baterias, apresenta também um valor bastante inferior em A do que em B.

Torna-se importante realçar que o grupo de baterias A apresenta valores de média aritmética e desvio padrão da condutância baixos, visto que um dos seus elementos apresenta um valor de condutância também bastante baixo, 248S, comparando com os 1810S de referência.

Ambos a média percentual e o desvio padrão percentual da condutância contribuem em grande parte para que o índice de saúde final dos dois grupos apresente uma diferença considerável, realçando que o grupo de baterias A encontra-se em pior condição que o grupo de baterias B.

De forma a conseguir fundamentar melhor este tipo de sinalizações, foi realizada, em conjunto com o gestor de manutenção de baterias do departamento do norte da ORD, uma pesquisa ao registo de eventos do Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) da ORD. Esta pesquisa foi realizada com a finalidade de obter informação que pudesse corroborar e fundamentar o pior índice de saúde do grupo de baterias A, como: tempo de funcionamento e a profundidade das descargas (DOD) dos grupos de baterias.

Deste modo, foram recolhidos todos os alarmes do registo de eventos da ORD, que revelassem uma falha de alimentação CA à subestação ou que levassem a Subestação a recorrer aos grupos de baterias do Sistema de Alimentação de Corrente Contínua (SACC), entre eles:

- Atuação do disjuntor Geral do sistema de alimentação;
- Atuação do disjuntor do alimentador;
- Falta de alimentação CA;

Não foram considerados alarmes referentes à falha do alimentador, visto serem eventos bastante difíceis de filtrar em SCADA pois podem estar associados a falhas que não requeiram as baterias.

Visto que os grupos de baterias em análises apresentam 10 e 11 anos de idades, foi realizada uma tentativa de recolher os dados referentes a estes alarmes nos últimos 11 anos. No entanto, o arquivo de registo de eventos da ORD, só possibilita a visualização e aquisição dos dados referentes a estes alarmes nos últimos 5 anos.

Embora não tenha sido conseguida a aquisição dos alarmes nos últimos 11 anos, sendo que este cenário seria o ideal para fundamentar o algoritmo desenvolvido, já é possível obter uma visão representativa e comparativa a partir dos alarmes nos últimos 5 anos. Por conseguinte, na tabela 6.3 estão representados os tempos de falha dos grupos de baterias em análise nos últimos 5 anos.

Grupos de baterias	A	B
Tempo de falha no disjuntor geral	1h 30m 40s	0h 0m 0s
Tempo de falha no disjuntor do alimentador	0h 0m 0s	0h 12m 55s
Tempo de falha na rede CA	0h 0m 0s	0h 0m 0s
Tempo total de falhas	1h 30m 40s	0h 12m 55s

Tabela 6.3: Tempo de falhas que resultem na utilização dos grupos de baterias

Após a análise dos tempos de falha dos dois grupos de baterias, foi possível concluir que a profundidade das descargas (DOD) não deveria ser considerada, visto que estas nunca foram superiores a 10% da capacidade nominal do grupo de baterias. Tendo em conta que para a consideração de uma descarga profunda, é necessário que esta seja de pelo menos 80% da capacidade nominal do grupo de baterias. Neste caso, foi possível inferir que a a profundidade de descarga não contribuiria para a deterioração da condição dos grupos de baterias.

O tempo de funcionamento dos grupos de baterias foi um parâmetro utilizado para comparar a condição entre os dois grupos de baterias, bem como a sua diferença de índice de saúde. Deste modo, a partir da tabela 6.3, é possível observar que o grupo A apresenta um tempo total de falhas bastante superior ao grupo B, sendo que o tempo total de falhas traduz-se em tempo de funcionamento dos grupos de baterias.

Portanto, considerando que o tempo total de funcionamento dos grupos de baterias está diretamente relacionado com o seu desgaste ou perda de condição das mesmas. É possível inferir que pelo tempo total de funcionamento dos grupos de baterias, o grupo A encontra-se numa pior condição do que o grupo B, logo também deverá apresentar um índice de saúde inferior que o grupo B.

Observando a tabela 6.2, é possível verificar que o índice de saúde do grupo de baterias A é realmente bastante inferior que o grupo B, aproximadamente 77% e 88%, respetivamente. Concluindo, foi possível validar as sinalizações obtidas pelo algoritmo desenvolvido através dos alarmes do registo de eventos da ORD e consequentemente recorrendo ao tempo total de funcionamento dos grupos de baterias.

Para concluir, este tipo de sinalizações são bastante importantes para os gestores dos sistemas de baterias da ORD visto que, normalmente os grupos de baterias com uma maior idade, apresentam um índice de saúde mais baixo. Deste modo, estas sinalizações conseguidas pelo algoritmo desenvolvido, permitem melhorar os processos de manutenção e substituição dos grupos de baterias e consequentemente aumentar a esperança de vida destes ativos.

6.3.3 Ensaio real para validação de sinalizações

Neste subcapítulo, é apresentada a metodologia utilizada para a realização de um ensaio de autonomia aos grupos de baterias analisados no subcapítulo anterior 6.3.2, bem como a exposição e análise dos resultados obtidos.

Estes ensaios foram realizados com o objetivo de validar toda a análise feita às sinalizações do subcapítulo anterior 6.3.2, visto que este fornece informação relativa à capacidade total disponível dos grupos de baterias, sendo assim possível inferir qual dos grupos está em pior condição.

Os ensaios de autonomia, foram efetuados nas Subestações AT/MT de Vale de Cambra e Carregosa. Estes ensaios, consistiram numa descarga completa aos dois grupos de baterias, de forma a avaliar a sua capacidade total disponível. Para este ensaio foram utilizados vários equipamentos com diferentes propósitos, entre eles:

- Unidade de descarga de baterias

Megger Torkel 840

- Multímetro para medição tensão por elemento

Fluke 117 True RMS Multimeter

- Analisador eletroquímico de baterias

EC2000

Para poder ensaiar os grupos de baterias, foi necessário certificar-se que a Subestação continuaria a ter fornecimento de corrente contínua, caso houvesse uma falha na rede. Desta forma, foi introduzido em paralelo com o sistema, um grupo de baterias de socorro com os níveis de tensão necessários (110V e 48V), de forma a garantir a alimentação da Subestação em caso de necessidade.

Posteriormente, o grupo de baterias a ser testado foi desligado do alimentador e foi ligado à unidade de descarga de baterias (Torkel 840), adotando sempre todas as medidas de segurança em consideração. A unidade de descarga de baterias foi configurada da seguinte forma:

- Tensão final de descarga (paragem):

Esta tensão foi configurada para 84V (1V por elemento, 84 elementos), visto que o fabricante não aconselha submeter a bateria a um descarga mais profunda que 1V por elemento [65].

- Corrente de descarga:

Os ensaios tiveram ambos a duração de 5 horas, com uma taxa corrente de descarga de C/5, ou seja, 42A já que a capacidade nominal é de 210Ah.

Durante a descarga, foi utilizado o multímetro Fluke 117 para confirmar se a tensão dos elementos se encontrava dentro da normalidade, ou seja, se não havia qualquer inversão de polaridade ou a existência de algum elemento com uma tensão baixa que pudesse comprometer os ensaios. Estas tensões foram medidas 4 vezes durante todo o ensaio, sendo que em nenhum dos ensaios se constatou a ocorrência de algum valor diferente do esperado.

Adicionalmente, foi utilizado o dispositivo EC2000, sendo este o equipamento utilizado pelos técnicos da ORD para realizar os ensaios semestrais MPS medidas aos grupos de baterias. Recorrendo a este dispositivo, foi realizado um ensaio semelhante ao MPS medidas, para confirmar que não houve qualquer alteração ou anomalia nos grupos comparando com o ultimo MPS medidas realizado pela ORD (6 meses).

Na figura 6.5, é possível observar o painel da unidade de descarga relativa ao ensaio de autonomia do grupo de baterias A, sendo que neste momento o ensaio já tinha terminado e o grupo de baterias encontrava-se a estabilizar para a sua tensão nominal de 100.8V (1,2V por elemento).



Figura 6.5: Fotografia do painel da unidade de descarga de baterias

No final dos ensaios, foram recolhidos os valores de capacidade total descarregada e tempo total de funcionamento dos grupos de baterias, estando estes apresentados na tabela 6.4.

Grupos de baterias	A	B
Capacidade nominal	210 Ah	210 Ah
Capacidade descarregada	202 Ah	204 Ah
Capacidade percentual	96.19%	97.15%
Tempo total da descarga	4h 48m	4h 54m

Tabela 6.4: Resultados dos ensaios de autonomia aos grupos de baterias A e B

Analisando os resultados obtidos, é possível constatar que ambos os grupos se encontram em boa condição, no entanto o grupo A apresenta uma capacidade total disponível ligeiramente inferior ao grupo B, bem como o tempo total de descarga. Embora estes resultados apresentem uma discrepância muito baixa, é suficiente para inferir que o grupo B se encontra em melhores condições que o grupo A, deste modo em concordância com a análise que foi realizada no subcapítulo anterior 6.3.2.

Apesar do grupo A ter apenas 10 anos, este apresenta um índice de saúde inferior do que o grupo B com 11 anos. Esta sinalização foi validada com sucesso pelos ensaios de autonomia realizados aos dois grupos de baterias.

De forma a corroborar por completo estas sinalizações, foi por ultimo realizada uma análise às temperatura médias das salas onde se encontram os armários de baterias dos últimos relatórios

MPS. Na tabela 6.5, é possível verificar que a média das temperaturas dos últimos relatórios é praticamente a mesma nos dois grupos de baterias. Esta verificação era importante pois uma temperatura elevada tem um impacto significativo e negativo na esperança de vida de uma bateria, deste modo poderia ter comprometido todas as validações.

Grupos de baterias	A	B
Média da temperatura	19 C°	18 C°

Tabela 6.5: Análise à média da temperatura nos últimos relatórios MPS

6.4 Dificuldades encontradas e soluções propostas

Nesta secção vão ser descritas as dificuldades encontradas durante a fase de teste do algoritmo desenvolvido, bem como as respetivas soluções propostas.

Em primeiro lugar, é importante referir novamente que o algoritmo desenvolvido tem como principal objetivo a compatibilidade entre todos os tipos, marcas e modelos de baterias utilizados pela ORD. Visto que, os modelos apresentam diferentes variações de parâmetros, foi necessário realizar uma análise geral aos parâmetros utilizados pelo algoritmo desenvolvido.

Após a análise realizada, foi possível averiguar que existia um modelo de baterias da ORD (Protect Line KPL210P), que apresentava valores de desvio padrão percentual da condutância bastante inferiores do resto dos modelos de baterias. Esta variação do desvio padrão percentual em baterias com menos de 1 ano, era quase de 10%, o que se traduzia numa diferença média de índice de saúde de quase 10% comparativamente com os restantes modelos de baterias. Torna-se importante realçar que estas variações no desvio padrão não ocorreram devido à má leitura ou mau estado de elementos isolados.

Desta forma, foram realizadas certas alterações à metodologia do algoritmo desenvolvido, com o objetivo de tornar os valores do desvio padrão percentual deste modelo específico de baterias, mais próximos dos restantes modelos de baterias da ORD. Contudo, sem comprometer o índice de saúde final dos restantes modelos de baterias. As alterações foram as seguintes:

- Alteração da seleção de peso mínimo entre a média aritmética e o desvio padrão para pesos algorítmicos de 70% para a média aritmética e 30% para o desvio padrão
- Mudança do parâmetro estatístico de desvio padrão para desvio médio

$$\text{desvio médio} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x - \mu| \quad (6.1)$$

6.5 Limitações do algoritmo EDP-IS-2018

Nesta secção vão ser discutidas algumas das limitações do algoritmo desenvolvido. Primeiramente, o índice de saúde estimado por este algoritmo não pode ser traduzido em capacidade

disponível, visto que não foi realizada nenhuma análise que relacionasse a capacidade disponível com os parâmetros de entrada do algoritmo. Adicionalmente, este algoritmo foi desenvolvido com o objetivo inicial de classificar e ordenar todos os grupos de baterias da ORD relativamente à sua condição geral e não à sua capacidade disponível.

O algoritmo EDP-IS-2018, encontra-se também bastante dependente dos ensaios semestrais MPS e MPS Medidas realizados aos grupos de baterias da ORD, sendo que se estes relatórios estiverem corrompidos ou danificados, os resultados do algoritmo são inconclusivos e não podem ser considerados.

Por ultimo, uma das limitações é também o facto de sempre que um novo modelo de baterias for adicionado à frota de baterias da ORD, é necessário adicionar também os dados de referência dos seus parâmetros de tensão e condutância. Caso os fornecedores não facultem estes valores de referência, é necessária alguma análise ou realização de medição para a sua obtenção.

Capítulo 7

Conclusões e propostas de melhoria

7.1 Conclusões

A realização desta dissertação permitiu a identificação de todo o processo de manutenção e substituição dos grupos de baterias, pertencentes aos Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua (SACC) da Operadora de Rede de Distribuição (ORD). Foi desenvolvido um algoritmo para estimação de índice de saúde de grupos de baterias da ORD, sendo que este algoritmo pode ser utilizado em todos os tipos, marcas e modelos de baterias existentes na ORD.

Verificou-se que atualmente na ORD, o processo de elegibilidade para substituição deste ativos é realizada de forma manual, recorrendo à experiência empírica do gestor de manutenção de baterias. De forma a melhorar e automatizar este processo, algoritmo EDP-IS-2018 permite avaliar o índice de saúde de todos os grupos de baterias da ORD, sem a necessidade de recorrer à experiência empírica do gestor.

Verificou-se que os ensaios MPS, utilizados para estimar o índice de saúde, se encontravam por vezes danificados ou com um formato diferente do habitual, dificultando e/ou tornando mais morosa a tarefa de estimação do índice de saúde.

Relativamente à validação realizada no capítulo 6, em primeiro lugar foram realizadas análises a vários grupos de baterias de diferentes tipos e idades, com o objetivo de validar que o algoritmo desenvolvido apresenta resultados satisfatórios para todos os tipos de baterias da ORD. Posteriormente, foram analisadas e validadas certas sinalizações, com o objetivo de validar que o algoritmo desenvolvido estimava o índice de saúde dos grupos de baterias.

Esta validação dividiu-se em 3 etapas. Em primeiro lugar, foi realizada uma análise aos parâmetros utilizados como entradas do algoritmo. Em segundo lugar, foi realizada uma pesquisa no registo de eventos do Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) da ORD. Por último, foram realizados dois ensaios de autonomia no local, de forma a corroborar a melhor condição de um grupo de baterias, validando assim as sinalizações indicadas pelo algoritmo desenvolvido.

Após estas 3 etapas, foi concluída com sucesso a validação destas sinalizações, sendo que estas permitem destacar grupos de baterias que apresentem uma menor idade do que outros grupos e no entanto apresentem um índice de saúde inferior. Desta forma, melhorando consideravelmente

a gestão destes ativos, considerando que atualmente a substituição dos ativos é realizada com um grande peso da idade do grupo em questão.

7.2 Propostas de melhoria

O algoritmo desenvolvido cumpriu todos os objetivos a que foi proposto, no entanto, existem vários pontos que poderiam ter sido explorados, sendo que um dos quais seria a incorporação de mais parâmetros de entrada no algoritmo, como a temperatura e a humidade, melhorando assim a estimativa do mesmo. Visto que tanto a temperatura como a humidade, são parâmetros que têm alguma influência na medição dos restantes parâmetros.

Seria também interessante realizar uma estimativa *online* do índice de saúde, sendo que a ORD já dispõe de alimentadores capazes de realizar uma monitorização *online*. Desta forma, teríamos acesso a um registo de dados com uma maior dimensão do que o atual, logo seria vantajoso realizar a estimativa do índice de saúde recorrendo a redes neuronais (ANN), uma vez que estas necessitam de um histórico de registos de dados com uma dimensão considerável para funcionarem de forma precisa.

Por fim, a utilização de um só modelo de baterias por parte da ORD, seria uma forma mais viável de implementar métodos de estimativa de índice de saúde baseados em modelos físicos, como o método de *Coulomb Counting* incorporando um Filtro de Kalman Estendido (EKF), sendo que só seria necessário modelar um modelo de baterias.

Ainda dentro dos métodos baseados em modelos físicos, considerando que só existiria um modelo de baterias, a realização de uma relação entre a tensão de descarga e o índice de saúde seria também um método bastante viável e preciso. Visto que a ORD já realiza descargas parciais nos ensaios de manutenção semestrais aos grupos de baterias.

Anexo A

Relatório MPS e MPS medidas de um grupo de baterias

Em primeiro lugar vai ser apresentado um exemplo de um relatório MPS e posteriormente um exemplo de um relatório MPS medidas no início e no final de um ensaio de autonomia

Cadastro			
Instalação:	ALVELOS	N.º:	Data: 05/06/2017 Hora:
Alimentador	110/125 VCC	48 VCC	24/12 VCC
Marca	EFACEC	EFACEC	-
Modelo	MOTN 125/40	CIB S 48/34X3	-
N.º Rectificadores	N/A	2XSM1800	-
Número Série	1504-0340	1504-1048	-
Ano	N/D	1994	-
Baterias	110/125 VCC	48 VCC	24/12 VCC
Marca	SAFT	EMISA	-
Modelo	SCL221	KGM119P	-
N.º Elementos	90	40	-
Capacidade	220	119	-
Ano	2012	N/D	-
PSM	110/125 VCC	48 VCC	
Número Série	N/A	N/A	

Notas Prévias

- 1) A realização das intervenções indicadas deverá ser sempre acompanhada da consulta da documentação técnica específica do(s) alimentador(es) e bateria(s).
- 2) Dever-se-à solucionar todas as anomalias detectadas durante a intervenção.
- 3) Na coluna "Cód." preencher com: N (Normal sem Intervenção); NI (Normal após intervenção); IC (Necessária Intervenção Complementar) ou NA (Não aplicável).
- 4) Na coluna "Nota" indicar o n.º da nota das observações que contém a informação complementar (Exemplo: Código NI, descrição da intervenção efectuada; Código IC, descrição da intervenção necessária).

1	Verificação Inicial	110V	48V	24/12	Cód.	Nota
1.1	Medir tensão em regime flutuante (V).	127,3	54,1	-	N	
1.2	Registar a corrente fornecida pelo alimentador em condições normais (A).	4,8	5,9	-	N	
1.3	Medir tensão em regime de reforço (V).	133	54	-	N	
1.4	Verificação do funcionamento das sinalizações locais (luminosa, sonora e aparelhos de medida).				N	
1.5	Verificação da limpeza interior e exterior.				NI	
1.6	Verificação do aperto das ligações eléctricas.				NI	
1.7	Verificação visual aos componentes (fugas de electrólito, corrosões, ...).				N	
1.8	Verificação do nível de electrólito de todos os elementos e eventual reposição.				NI	

Medição de impedância dos elementos de bateria

- 1) Parametrizar o equipamento de ensaio de acordo com as características da instalação e cada um dos grupos de baterias em análise.
- 2) Colocar ao serviço o grupo de baterias de socorro e isolar da instalação o grupo de baterias a ensaiar.
- 3) Efectuar os testes de tensão, impedância, temperatura e estado do electrólito (dry-out ou densidade) por elemento e gravar os resultados para posterior envio (anexar a este documento uma página de medidas por grupo de baterias).

Teste de autonomia

Efectuar uma **descarga** de 30 minutos com uma carga de C/5 A (C = Capacidade da bateria). As tensões devem ser monitorizadas, de modo a respeitarem o limite mínimo de tensão por elemento definido nas características da bateria. **Medir novamente** os vários parâmetros de teste por elemento (tensão, ...) gravar os resultados para posterior envio (anexar a este documento uma página de medidas por grupo de baterias).

Análise das medidas efetuadas aos elementos de bateria e, se necessário, realização de **carga revigorante**.

Ensaio de descarga

2	Registo de valores.	110V	48V	24/12
2.1	Tensão inicial (V).	115	50,1	-
2.2	Corrente de descarga (A).	40	20	-
2.3	Tempo de descarga (min.).	30	30	-
2.4	Após conclusão da descarga, registar os valores de tensão global final (V), repor o sistema e assegurar a passagem para regime de reforço do alimentador.	104,5	46,6	-
2.5	Medir e registar polaridade [+] à terra (V).	63,7	0,4	-
2.6	Medir e registar polaridade [-] à terra (V).	63,3	53,8	-
2.7	Aguardar pela conclusão da carga e assegurar a passagem para regime flutuante do alimentador.			

Verificação Final

3	Procedimento.	Cód.	Nota
3.1	Limpeza geral dos alimentadores e baterias.	NI	
3.2	Lubrificação de bornes e shunts e verificação dos respiros.	NI	
3.3	Verificação do funcionamento das sinalizações à distância.	IC	
3.4	Verificação do funcionamento do conjunto auto-religador.	NA	
3.5	Substituição dos fusíveis das tomadas de manutenção (se necessário).	N	
3.6	Verificar as condições de acondicionamento de fugas de electrólito.	N	
3.7	Registar as condições de climatização e ventilação da sala (p.e. necessidade de isolamento e/ou ar-condicionado).	N	24º
3.8	Medir e registar nas observações a diferença de potencial de cada polaridade à terra.	N	
3.9	Verificar a concordância entre os valores de tensão CA reais e os adquiridos pelo equipamento.	N	
3.10	Verificar o correto funcionamento do módulo de díodos redutores, conforme parametrizações implementadas.	NA	

Inicial

Bateria	Condutancia	Voltagem	Temperatura	Registro Horario
BAT1	1571	1,411	18	06/05/2017 14:18
BAT2	1527	1,381	18	06/05/2017 14:18
BAT3	1514	1,406	18	06/05/2017 14:19
BAT4	1529	1,411	18	06/05/2017 14:19
BAT5	1385	1,406	18	06/05/2017 14:19
BAT6	1524	1,406	18	06/05/2017 14:19
BAT7	1527	1,411	18	06/05/2017 14:19
BAT8	1549	1,411	18	06/05/2017 14:19
BAT9	1502	1,411	18	06/05/2017 14:19
BAT10	1509	1,406	18	06/05/2017 14:20
BAT11	1527	1,406	18	06/05/2017 14:20
BAT12	1513	1,411	18	06/05/2017 14:20
BAT13	1510	1,411	18	06/05/2017 14:20
BAT14	1507	1,411	18	06/05/2017 14:20
BAT15	1486	1,411	18	06/05/2017 14:20
BAT16	1555	1,411	18	06/05/2017 14:20
BAT17	1522	1,406	18	06/05/2017 14:21
BAT18	1491	1,406	18	06/05/2017 14:21
BAT19	1523	1,411	18	06/05/2017 14:22
BAT20	1522	1,406	18	06/05/2017 14:22
BAT21	1492	1,406	18	06/05/2017 14:22
BAT22	1539	1,411	18	06/05/2017 14:22
BAT23	1522	1,411	18	06/05/2017 14:22
BAT24	1497	1,406	18	06/05/2017 14:22
BAT25	1549	1,406	18	06/05/2017 14:23
BAT26	1507	1,406	18	06/05/2017 14:23
BAT27	1523	1,411	18	06/05/2017 14:23
BAT28	1481	1,411	18	06/05/2017 14:23
BAT29	1506	1,411	18	06/05/2017 14:23
BAT30	1512	1,416	18	06/05/2017 14:23
BAT31	1484	1,411	18	06/05/2017 14:24
BAT32	1464	1,411	18	06/05/2017 14:24
BAT33	1516	1,411	18	06/05/2017 14:24
BAT34	1469	1,411	18	06/05/2017 14:24
BAT35	1484	1,406	18	06/05/2017 14:24
BAT36	1506	1,406	18	06/05/2017 14:24
BAT37	1542	1,401	18	06/05/2017 14:24
BAT38	1516	1,401	18	06/05/2017 14:25
BAT39	1483	1,406	18	06/05/2017 14:25
BAT40	1492	1,406	18	06/05/2017 14:25
BAT41	1475	1,406	18	06/05/2017 14:25
BAT42	1477	1,411	18	06/05/2017 14:25
BAT43	1466	1,406	18	06/05/2017 14:25
BAT44	1410	1,411	18	06/05/2017 14:25
BAT45	1409	1,411	18	06/05/2017 14:26
BAT46	1389	1,411	18	06/05/2017 14:26
BAT47	1369	1,411	18	06/05/2017 14:26
BAT48	1515	1,406	18	06/05/2017 14:26
BAT49	1538	1,411	18	06/05/2017 14:27
BAT50	1475	1,416	18	06/05/2017 14:27
BAT51	1566	1,406	18	06/05/2017 14:27
BAT52	1558	1,411	18	06/05/2017 14:27
BAT53	1498	1,411	18	06/05/2017 14:27

BAT54	1566	1,406	18	06/05/2017 14:27
BAT55	1537	1,406	18	06/05/2017 14:27
BAT56	1540	1,406	18	06/05/2017 14:28
BAT57	1590	1,411	18	06/05/2017 14:28
BAT58	1585	1,411	18	06/05/2017 14:28
BAT59	1584	1,411	18	06/05/2017 14:28
BAT60	1505	1,411	18	06/05/2017 14:28
BAT61	1509	1,406	18	06/05/2017 14:28
BAT62	1498	1,411	18	06/05/2017 14:28
BAT63	1491	1,411	18	06/05/2017 14:29
BAT64	1497	1,406	18	06/05/2017 14:29
BAT65	1492	1,411	18	06/05/2017 14:29
BAT66	1480	1,411	18	06/05/2017 14:29
BAT67	1533	1,411	18	06/05/2017 14:29
BAT68	1538	1,411	18	06/05/2017 14:29
BAT69	1489	1,411	18	06/05/2017 14:30
BAT70	1533	1,411	18	06/05/2017 14:30
BAT71	1500	1,411	18	06/05/2017 14:30
BAT72	1512	1,411	18	06/05/2017 14:30
BAT73	1544	1,401	18	06/05/2017 14:30
BAT74	1528	1,406	18	06/05/2017 14:30
BAT75	1528	1,416	18	06/05/2017 14:31
BAT76	1489	1,411	18	06/05/2017 14:31
BAT77	1532	1,411	18	06/05/2017 14:31
BAT78	1541	1,411	18	06/05/2017 14:31
BAT79	1517	1,411	18	06/05/2017 14:31
BAT80	1471	1,411	18	06/05/2017 14:31
BAT81	1517	1,411	18	06/05/2017 14:31
BAT82	1510	1,416	18	06/05/2017 14:32
BAT83	1505	1,411	18	06/05/2017 14:32
BAT84	1528	1,411	18	06/05/2017 14:32
BAT85	1514	1,406	18	06/05/2017 14:32
BAT86	1539	1,411	18	06/05/2017 14:32
BAT87	1507	1,416	18	06/05/2017 14:33
BAT88	1487	1,411	18	06/05/2017 14:33
BAT89	1530	1,411	18	06/05/2017 14:33
BAT90	1583	1,411	18	06/05/2017 14:33

Final

Bateria	Condutancia	Voltagem	Temperatura	Registro Horario
BAT1	NA	1,251	17	06/05/2017 15:05
BAT2	NA	1,251	17	06/05/2017 15:05
BAT3	NA	1,251	17	06/05/2017 15:05
BAT4	NA	1,262	17	06/05/2017 15:05
BAT5	NA	1,242	17	06/05/2017 15:05
BAT6	NA	1,251	17	06/05/2017 15:05
BAT7	NA	1,251	17	06/05/2017 15:05
BAT8	NA	1,256	17	07/05/2017 15:06
BAT9	NA	1,256	17	07/05/2017 15:06
BAT10	NA	1,247	17	07/05/2017 15:06
BAT11	NA	1,246	17	10/05/2017 15:07
BAT12	NA	1,242	17	10/05/2017 15:07
BAT13	NA	1,247	17	10/05/2017 15:07
BAT14	NA	1,249	17	10/05/2017 15:07
BAT15	NA	1,258	17	10/05/2017 15:07
BAT16	NA	1,247	17	10/05/2017 15:07
BAT17	NA	1,256	17	10/05/2017 15:07
BAT18	NA	1,247	17	17/05/2017 15:08
BAT19	NA	1,243	17	17/05/2017 15:08
BAT20	NA	1,243	17	17/05/2017 15:08
BAT21	NA	1,242	17	17/05/2017 15:08
BAT22	NA	1,245	17	17/05/2017 15:08
BAT23	NA	1,235	17	22/05/2017 15:09
BAT24	NA	1,236	17	22/05/2017 15:09
BAT25	NA	1,248	17	22/05/2017 15:09
BAT26	NA	1,249	17	25/05/2017 15:10
BAT27	NA	1,247	17	25/05/2017 15:10
BAT28	NA	1,249	17	27/05/2017 15:11
BAT29	NA	1,249	17	27/05/2017 15:11
BAT30	NA	1,249	17	27/05/2017 15:11
BAT31	NA	1,246	17	27/05/2017 15:11
BAT32	NA	1,246	17	27/05/2017 15:11
BAT33	NA	1,247	17	27/05/2017 15:11
BAT34	NA	1,246	17	27/05/2017 15:11
BAT35	NA	1,247	17	03/06/2017 15:12
BAT36	NA	1,246	17	03/06/2017 15:12
BAT37	NA	1,246	17	03/06/2017 15:12
BAT38	NA	1,246	17	03/06/2017 15:12
BAT39	NA	1,246	17	07/06/2017 15:13
BAT40	NA	1,246	17	07/06/2017 15:13
BAT41	NA	1,246	17	07/06/2017 15:13
BAT42	NA	1,246	17	07/06/2017 15:13
BAT43	NA	1,246	17	07/06/2017 15:13
BAT44	NA	1,246	17	07/06/2017 15:13
BAT45	NA	1,246	17	07/06/2017 15:13
BAT46	NA	1,246	17	14/06/2017 15:14
BAT47	NA	1,246	17	14/06/2017 15:14
BAT48	NA	1,251	17	14/06/2017 15:14
BAT49	NA	1,246	17	17/06/2017 15:15
BAT50	NA	1,246	17	17/06/2017 15:15
BAT51	NA	1,251	17	17/06/2017 15:15
BAT52	NA	1,246	17	17/06/2017 15:15
BAT53	NA	1,246	17	17/06/2017 15:15

BAT54	NA	1,246	17	17/06/2017 15:15
BAT55	NA	1,246	17	23/06/2017 15:17
BAT56	NA	1,246	17	23/06/2017 15:17
BAT57	NA	1,246	17	23/06/2017 15:17
BAT58	NA	1,246	17	23/06/2017 15:17
BAT59	NA	1,251	17	23/06/2017 15:17
BAT60	NA	1,246	17	23/06/2017 15:17
BAT61	NA	1,251	17	23/06/2017 15:17
BAT62	NA	1,246	17	23/06/2017 15:17
BAT63	NA	1,246	17	01/07/2017 15:18
BAT64	NA	1,251	17	01/07/2017 15:18
BAT65	NA	1,251	17	01/07/2017 15:18
BAT66	NA	1,246	17	04/07/2017 15:19
BAT67	NA	1,241	17	04/07/2017 15:19
BAT68	NA	1,244	17	04/07/2017 15:19
BAT69	NA	1,244	17	04/07/2017 15:19
BAT70	NA	1,244	17	04/07/2017 15:19
BAT71	NA	1,245	17	09/07/2017 15:20
BAT72	NA	1,251	17	09/07/2017 15:20
BAT73	NA	1,247	17	09/07/2017 15:20
BAT74	NA	1,247	17	09/07/2017 15:20
BAT75	NA	1,247	17	09/07/2017 15:20
BAT76	NA	1,242	17	09/07/2017 15:20
BAT77	NA	1,252	17	09/07/2017 15:20
BAT78	NA	1,251	17	09/07/2017 15:20
BAT79	NA	1,249	17	17/07/2017 15:22
BAT80	NA	1,252	17	17/07/2017 15:22
BAT81	NA	1,252	17	17/07/2017 15:22
BAT82	NA	1,252	17	17/07/2017 15:22
BAT83	NA	1,252	17	21/07/2017 15:23
BAT84	NA	1,253	17	21/07/2017 15:23
BAT85	NA	1,253	17	23/07/2017 15:24
BAT86	NA	1,253	17	23/07/2017 15:24
BAT87	NA	1,253	17	23/07/2017 15:24
BAT88	NA	1,252	17	23/07/2017 15:24
BAT89	NA	1,255	17	27/07/2017 15:25
BAT90	NA	1,257	17	28/07/2017 15:26

Anexo B

Relatórios individuais dos grupos de baterias das Subestações de Carregosa e Vale de Cambra

Subestação: Carregosa [110V] Nr.º Elementos do Grupo: 84
 Grupo de Baterias: PROTECT LINE KPL210P [Alcal Ano de Instalação do Grupo: 2008]

Estimação do Estado de Saúde - Algoritmo EDP-ISB

Tipologias de Bate Corrosão Armá
 Idade do Grupo de Baterias: 9 anos Corrosão Bater
 Tensão de Referência EDPD-ISB [Vcc]: **90.94%**
 Nr.º de Elem. [80,95]%Vref: 0 (100%) EDPD-IS: **90.94%**
 Nr.º de Elem. [0,80]%Vref: 0 (100%) EDPD-IS-2018: **77.15%**
 Condutância de Referência

Tensão (Vcc) Estatística			
Média Aritmética	Média (%Vref)		
1.2461V	103.8442%		
Desvio Padrão	Desvio Padrão %		
0.00535V	99.5704%		
Peso Média	50%		
Peso Desvio	50%		
Intervalo	1.2408V	6	Elementos fora de limites
[-1σ + 1σ]	1.2515V		
Intervalo	1.2354V	6	
[-2σ + 2σ]	1.2568V		
Intervalo	1.2301V	1	
[-3σ + 3σ]	1.2622V		

Condutância Estatística			
Média Aritmética	Média (%Rref)		
1449.3571	80.0750%		
Desvio Padrão	Desvio Padrão %		
280.29974	87.3622%		
Peso Média	17.59%		
Peso Desvio	17.57%		
Intervalo	1169.057	9	Elementos fora de limites
[-1σ + 1σ]	1729.656		
Intervalo	888.757	3	
[-2σ + 2σ]	2009.95		
Intervalo	608.457	2	
[-3σ + 3σ]	2290.25		

Figura B.1: Relatório individual do grupo de baterias A da Subestação de Carregosa

Subestação: Vale de cambra [110V]
Nr.º Elementos do Grupo: 84

Grupo de Baterias: PROTECT LINE KPL210P [Alcal Ano de Instalação do Grupo: 2007]

Estimação do Estado de Saúde - Algoritmo EDP-ISB

Tipologias de Bate
Alcalina

Idade do Grupo de Baterias: 10 anos

Tensão de Referência
1,2

Nr.º de Elem.]80,95]%Vref: 0 (100%)

Nr.º de Elem. [0,80]%Vref: 0 (100%)

Condutância de Referência
1810

Corrosão Armá
Sem Corrosão

Corrosão Bater
Nenhuma bateria com danos

EDPD-ISB [Vcc]:
89.7%

EDPD-IS
89.7%

EDPD-IS-2018
87.74%

Recalcular

Tensão (Vcc) Estatística

Média Aritmética	Média (%Vref)
1.2461V	103.8442%
Desvio Padrão	Desvio Padrão %
0.00535V	99.5704%
Peso Média	50%
Peso Desvio	50%

Intervalo	1.2408V	6	Elemen tos fora de limites
[$-1\sigma + 1\sigma$]	1.2515V		
Intervalo	1.2354V	6	
[$-2\sigma + 2\sigma$]	1.2568V		
Intervalo	1.2301V	1	
[$-3\sigma + 3\sigma$]	1.2622V		

Condutância Estatística

Média Aritmética	Média (%Rref)
1701.9405	94.0299%
Desvio Padrão	Desvio Padrão %
221.49706	91.4198%
Peso Média	30.92%
Peso Desvio	24.27%

Intervalo	1480.443	9	Elemen tos fora de limites
[$-1\sigma + 1\sigma$]	1923.437		
Intervalo	1258.946	3	
[$-2\sigma + 2\sigma$]	2144.934		
Intervalo	1037.449	2	
[$-3\sigma + 3\sigma$]	2366.431		

Figura B.2: Relatório individual do grupo de baterias B da Subestação de Vale de Cambra

Referências

- [1] D. Lima, “Automação em subestações da rede nacional de distribuição, presente e futuro.” Mar. 2012 - Documento interno da EDP Distribuição.
- [2] F. J. T. Ribeiro, “Sistema de gestão de estudos e ensaios aplicados a baterias da rede elétrica de distribuição,” mathesis, ISEP, 2017.
- [3] D. DAT, DMN, “Instalações at e mt sistemas de alimentação de corrente contínua 110/48 vcc características e ensaios,” Jan. 2017.
- [4] C. R. Spitzer and C. Spitzer, *Digital Avionics Handbook Cap.10*. CRC press, 2000.
- [5] F. D. Ltée/Ltd, “Electricity and new energy lead-acid batteries,” 2010.
- [6] SAFT - Ni-Cd Single Cells Range, 2010. Disponível em: “www.saftbatteries.com”.
- [7] GEI - Handheld ElectroChemical Battery Analyzer: Technical Data Sheet. Global Energy Innovations (GEI), 2013. Disponível em: “www.globalei.com”.
- [8] FLUKE - BT521 Battery Analyser: Users Manual, 2014. Disponível em: “www.fluke.com”.
- [9] K. Propp, A. Fotouhi, and D. J. Auger, “Low-cost programmable battery dischargers and application in battery model identification,” in *Computer Science and Electronic Engineering Conference (CEECE), 2015 7th*, pp. 225–230, IEEE, 2015.
- [10] H. Yang, Y. Qiu, and X. Guo, “Prediction of state-of-health for nickel-metal hydride batteries by a curve model based on charge-discharge tests,” *Energies*, vol. 8, no. 11, pp. 12474–12487, 2015.
- [11] K. S. Ng, C.-S. Moo, Y.-P. Chen, and Y.-C. Hsieh, “Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries,” *Applied energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1506–1511, 2009.
- [12] M. Galeotti, C. Giammanco, L. Cina, S. Cordiner, and A. Di Carlo, “Diagnostic methods for the evaluation of the state of health (soh) of nimh batteries through electrochemical impedance spectroscopy,” in *Industrial Electronics (ISIE), 2014 IEEE 23rd International Symposium on*, pp. 1641–1646, IEEE, 2014.
- [13] M. Ismail, R. Dlyma, A. Elrakaybi, R. Ahmed, and S. Habibi, “Battery state of charge estimation using an artificial neural network,” in *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2017 IEEE*, pp. 342–349, IEEE, 2017.
- [14] D. Jiani, L. Zhitao, W. Youyi, and W. Changyun, “A fuzzy logic-based model for li-ion battery with soc and temperature effect,” in *Control & Automation (ICCA), 11th IEEE International Conference on*, pp. 1333–1338, IEEE, 2014.

- [15] X. L. Liu, Z. M. Cheng, F. Y. Yi, and T. Y. Qiu, "Soc calculation method based on extended kalman filter of power battery for electric vehicle," in *Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE), 2017 12th International Conference on*, pp. 1–4, IEEE, 2017.
- [16] J. Qi and D. D.-C. Lu, "Review of battery cell balancing techniques," *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1–6, 2014.
- [17] I. I. D. INTS, ICTS, "Instalações at e mt subestações de distribuição projecto-tipo – memória descritiva," Feb. 2007.
- [18] DTI, "Instalações at e mt subestações de distribuição sistemas de protecção, comando e controlo numéricos (spcc) protocolos de comunicação," June 2009.
- [19] I. D. INTS, ICTS, "Instalações at e mt subestações de distribuição generalidades: Sistemas de protecção, comando e controlo numérico (spcc). interface humano – máquina especificação funcional," Feb. 2007.
- [20] I. e. D. ICTS, INTS, "Instalações at e mt subestações de distribuição sistemas de alimentação de corrente contínua com baterias do tipo alcalino características e ensaios," Feb. 2007.
- [21] D. Berndt, "Electrochemical energy storage," *ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING*, pp. 1–100, 2003.
- [22] L. David and B. R. Thomas, "Handbook of batteries," 2001.
- [23] *Manual de Baterias Bosch*, 2007. Disponível em: "www.bosch.com".
- [24] M. Team *et al.*, "A guide to understanding battery specifications," 2008.
- [25] M. Murnane and A. Ghazel, "A closer look at state of charge (soc) and state of health (soh) estimation techniques for batteries," 2017.
- [26] B. S. Bhangu, P. Bentley, D. A. Stone, and C. M. Bingham, "Nonlinear observers for predicting state-of-charge and state-of-health of lead-acid batteries for hybrid-electric vehicles," *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 54, no. 3, pp. 783–794, 2005.
- [27] P. Frost, B. J. Koch, D. R. Frisch, B. B. Stawinski, P. M. Laskowsky, K. M. Johnson, and R. C. Baraszu, "Battery state-of-charge estimation for hybrid and electric vehicles using extended kalman filter techniques," Feb. 21 2017. US Patent 9,575,128.
- [28] R. M. Dell and D. A. J. Rand, *Understanding batteries*. Royal Society of Chemistry, 2001.
- [29] T. P. Crompton, *Battery reference book*. Newnes, 2000.
- [30] A. A. Hussein and A. A. Fardoun, "Design considerations and performance evaluation of outdoor pv battery chargers," *Renewable Energy*, vol. 82, pp. 85–91, 2015.
- [31] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Applied Energy*, vol. 137, pp. 511–536, 2015.
- [32] J. Haase, F. AlJuheshi, H. Nishi, J. Ploennigs, K. F. Tsang, N. Aljuhaishi, and M. Alahmad, "Analysis of batteries in the built environment an overview on types and applications," in *Industrial Electronics Society, IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE*, pp. 8113–8118, IEEE, 2017.

- [33] L. Shenzhen Center Power Tech. Co., *VISION Rechargeable Products Lead-Acid Battery.FM Series General Purpose Applications Products Guide*, Apr. 2008.
- [34] X. Liu and W. Wang, "Vrla battery system reliability and proactive maintenance," in *Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 32nd International*, pp. 1–7, IEEE, 2010.
- [35] O. S. W. Al-Qasem, "Modeling and simulation of lead-acid storage batteries within photo-voltaic power systems," *A Thesis Presented to the An-Najah National University, Palestine*, 2012.
- [36] E. Rodrigues, R. Godina, G. Osório, J. Lujano-Rojas, J. Matias, and J. Catalão, "Comparison of battery models for energy storage applications on insular grids," in *Power Engineering Conference (AUPEC), 2015 Australasian Universities*, pp. 1–6, IEEE, 2015.
- [37] S.-O. C. V. . O. 200. Disponível em: "www.sunlight.gr".
- [38] H. A. Kiehne, *Battery technology handbook*, vol. 118. CRC Press, 2003.
- [39] N. Mars, F. Krouz, F. Louar, and L. Sbita, "Comparison study of different dynamic battery model," in *Green Energy Conversion Systems (GECS), 2017 International Conference on*, pp. 1–6, IEEE, 2017.
- [40] E. Rodrigues, R. Godina, G. Osório, J. Lujano-Rojas, J. Matias, and J. Catalão, "Comparison of battery models for energy storage applications on insular grids," in *Power Engineering Conference (AUPEC), 2015 Australasian Universities*, pp. 1–6, IEEE, 2015.
- [41] *SAFT - SCL 221 – Cell data sheet*, 2010. Disponível em: "www.saftbatteries.com".
- [42] I. of Electrical and E. E. (IEEE), eds., *1188a-2014 - IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Batteries for Stationary Applications - Amendment 1: Updated VRLA Maintenance Considerations*, 2014.
- [43] I. of Electrical and E. E. (IEEE), eds., *1188-2005 - IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Batteries for Stationary Applications*, 2005.
- [44] I. of Electrical and E. E. (IEEE), eds., *1106-2015 - IEEE Recommended Practice for Installation, Maintenance, Testing, and Replacement of Vented Nickel-Cadmium Batteries for Stationary Applications*, 2015.
- [45] A. P. Gabriel L. Bressanini, Tiago D. C. Busarello, "Design and implementation of lead-acid battery state-of-health and state-of-charge measurements," 2017.
- [46] M. V. Micea, L. Ungurean, G. N. Carstoiu, and V. Groza, "Online state-of-health assessment for battery management systems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 6, pp. 1997–2006, 2011.
- [47] C. Zhang, J. Jiang, L. Zhang, S. Liu, L. Wang, and P. C. Loh, "A generalized soc-ocv model for lithium-ion batteries and the soc estimation for lnmcO battery," *Energies*, vol. 9, no. 11, p. 900, 2016.
- [48] W. Waag, S. Käbitz, and D. U. Sauer, "Experimental investigation of the lithium-ion battery impedance characteristic at various conditions and aging states and its influence on the application," *Applied Energy*, vol. 102, pp. 885–897, 2013.

- [49] G. Fathoni, S. A. Widayat, P. A. Topan, A. Jalil, A. I. Cahyadi, and O. Wahyunggoro, "Comparison of state-of-charge (soc) estimation performance based on three popular methods: Coulomb counting, open circuit voltage, and kalman filter," in *Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT), 2017 2nd International Conference on*, pp. 70–74, IEEE, 2017.
- [50] D.-I. Stroe, M. Swierczynski, A.-I. Stroe, V. Knap, R. Teodorescu, and S. J. Andreasen, "Evaluation of different methods for measuring the impedance of lithium-ion batteries during ageing," in *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2015 Tenth International Conference on*, pp. 1–8, IEEE, 2015.
- [51] P.-C. Wu, W.-C. Hsu, and J.-F. Chen, "Detection on soc of vrla battery with eis," in *Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), 2013 1st International*, pp. 897–902, IEEE, 2013.
- [52] J. Chen, Q. Ouyang, C. Xu, and H. Su, "Neural network-based state of charge observer design for lithium-ion batteries," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 26, no. 1, pp. 313–320, 2018.
- [53] G. May and A. El-Shahat, "Battery-degradation model based on the ann regression function for ev applications," in *Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), 2017 IEEE*, pp. 1–3, IEEE, 2017.
- [54] M. M. Ismail and M. M. Hassan, "The state of charge estimation for rechargeable batteries based on artificial neural network techniques," in *Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2013 International Conference on*, pp. 733–739, IEEE, 2013.
- [55] L. Ungurean, G. Cârstoiu, M. V. Micea, and V. Groza, "Battery state of health estimation: a structured review of models, methods and commercial devices," *International Journal of Energy Research*, vol. 41, no. 2, pp. 151–181, 2017.
- [56] F. Codeca, S. M. Savaresi, and G. Rizzoni, "On battery state of charge estimation: A new mixed algorithm," in *Control Applications, 2008. CCA 2008. IEEE International Conference on*, pp. 102–107, IEEE, 2008.
- [57] G. Fathoni, S. A. Widayat, P. A. Topan, A. Jalil, A. I. Cahyadi, and O. Wahyunggoro, "Comparison of state-of-charge (soc) estimation performance based on three popular methods: Coulomb counting, open circuit voltage, and kalman filter," in *Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT), 2017 2nd International Conference on*, pp. 70–74, IEEE, 2017.
- [58] F. N. Dişçi, Y. El-Kahlout, and A. Balıkcı, "Li-ion battery modeling and soc estimation using extended kalman filter," in *Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2017 10th International Conference on*, pp. 166–169, IEEE, 2017.
- [59] A. C.-F. Liu, H. S.-H. Chung, W. Wang, R. W.-H. Lau, and J. Zhang, "Diagnostic cell for large-scale battery bank," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2017 IEEE*, pp. 993–1000, IEEE, 2017.
- [60] M. Zhu, W. Hu, and N. C. Kar, "The soh estimation of lifepo4 battery based on internal resistance with grey markov chain," in *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2016 IEEE*, pp. 1–6, IEEE, 2016.

- [61] M. I. Wahyuddin, P. S. Priambodo, and H. Sudibyo, “Direct current load effects on series battery internal resistance,” in *Quality in Research (QiR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering, 2017 15th International Conference on*, pp. 120–123, IEEE, 2017.
- [62] “Battery univesity - understanding the importance of low conductivity.,” 2017. Disponível em: “www.batteryuniversity.com”.
- [63] I. Aizpuru, U. Iraola, J. Canales, E. Unamuno, and I. Gil, “Battery pack tests to detect unbalancing effects in series connected li-ion cells,” in *Clean Electrical Power (ICCEP), 2013 International Conference on*, pp. 99–106, IEEE, 2013.
- [64] N. Yang, X. Zhang, B. Shang, and G. Li, “Unbalanced discharging and aging due to temperature differences among the cells in a lithium-ion battery pack with parallel combination,” *Journal of Power Sources*, vol. 306, pp. 733–741, 2016.
- [65] L. Storage Battery Systems, *KP Series Single Cell Battery Nickel Cadmium Pocket Plate Batteries*.

